

FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL

ANA BEATRIZ ESCÓRCIO TAVARES SILVA
MATRÍCULA: 20901058

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO DO DISTRITO
FEDERAL EM CONTATO COM GASOLINA COMUM**

Brasília
2013

ANA BEATRIZ ESCÓRCIO TAVARES SILVA

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO DO DISTRITO FEDERAL
EM CONTATO COM GASOLINA COMUM**

Trabalho de Curso (TC) apresentado como
um dos requisitos para a conclusão do
curso de Engenharia Civil do UniCEUB -
Centro Universitário de Brasília

Orientador: Eng.^a Civil Maruska Tatiana
N.da Silva, D.Sc.

**Brasília
2013**

ANA BEATRIZ ESCÓRIO TAVARES SILVA

**ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DE UM SOLO DO DISTRITO FEDERAL
EM CONTATO COM GASOLINA COMUM**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia
Civil do UniCEUB - Centro
Universitário de Brasília

Orientador: Eng.^a Civil Maruska
Tatiana N.Silva, D.Sc.

Brasília, 24 de Novembro de 2013.

Banca Examinadora

Eng^a. Civil: Maruska Tatiana Nascimento da Silva, D.Sc.
Orientadora

Eng. Civil: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc.
Examinador Interno

Prof.(a): Cláudia Marcia Coutinho Gurjão, D.Sc.
Examinador Externo, UnB

Agradecimentos

À Deus, sempre em primeiro lugar, magnificamente o maior engenheiro de todos;

À professora Maruska, não só pela orientação e dedicação, mas por não desistir deste trabalho mesmo diante das inúmeras dificuldades;

Aos técnicos do laboratório de solos Vanilson (Vanvan), Regis (Passarinho) e Dida, pelo auxílio nos ensaios e pelas boas risadas. Sem vocês, com certeza, não seria tão divertido vencer essa etapa;

Ao Vinícius e ao Leo, da HASAAN, pela boa vontade, sempre, em ajudar;

Ao Paulo César, do laboratório Soloquímica, pelos esclarecimentos e serviços prestados;

Ao professor e coordenador Jocinez, pelo auxílio financeiro para esta pesquisa;

Ao curso de Arquitetura e Urbanismo, por ceder o espaço físico do canteiro de obras para armazenamento dos reservatórios utilizados na pesquisa;

Ao professor Jairo Furtado, pelas dicas valiosas;

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica e que ao longo dos anos contribuíram com conhecimento para esta pesquisa;

Aos colegas de turma, pelos bons e “sofridos” momentos compartilhados em sala de aula. Em especial à Isadora, pelos CINCO ANOS de companheirismo;

Aos colegas da Brasal Incorporações, pela compreensão e flexibilidade diante da demanda deste trabalho;

Ao Vovô Alberto (*i. m.*), meu exemplo de vida e colega de profissão;

Ao meu irmão Dante, pelos conselhos e conversas engrandecedoras;

À toda minha amada família e às minhas amigas do coração;

Ao Thiago, meu maior exemplo de determinação, por todo o amor, serenidade e fé;

Aos meus pais, Ana Virgínia e Paulo, que sempre fizeram as escolhas certas para mim, por todo amor e sacrifício;

À minha madrinha, Ana Maria, e novamente à mamãe, exemplos de engenheiras, pela torcida verdadeira;

A todos, que de alguma forma contribuíram para esta pesquisa e para minha jornada rumo ao mercado de trabalho, muito obrigada!

RESUMO

Sabe-se que as obras de engenharia são executadas para durarem muitos anos, no entanto devem ocorrer as manutenções ao longo da vida útil dos empreendimentos. Um posto de gasolina em funcionamento também deve seguir critérios de manutenção tendo em vista evitar possíveis vazamentos. Porém, dificilmente observa-se manutenção ou verificação das condições dos tanques enterrados no solo, nos quais se encontram todo o fluido que abastece o posto. Nesta pesquisa buscou-se entender o processo de contaminação do solo por meio do contato deste material com a gasolina comum. Foi simulada em laboratório, para variados tempos, a contaminação de um solo argilo-arenoso do Distrito Federal. Para o citado processo compactou-se corpos de prova (CP) seguindo as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), e em seguida estes CP's foram submetidos ao contato com o citado fluido agressivo. Para avaliar a sequência de contaminação realizou-se ensaios de adensamento antes e após o contato do solo com a gasolina e ainda, fez-se análise química dos citados materiais. Observou-se que realmente ocorrem alterações no solo quando em contato com a gasolina comum, e cita-se como uma alteração relevante as variações de matéria orgânica observadas nos resultados da análise química e ainda as alterações no valor do índice de vazios nos solos para os variados períodos de contaminação quando comparados com os resultados das amostras antes do contato com o fluido.

Palavras chaves: solo, contaminação, gasolina comum

ABSTRACT

Usually engineering constructions are designed to last many years. However, regular maintenance is imperative over the life cycle of the projects to guarantee the intended performance and durability. A gas station in operation should also follow maintenance protocols in order to avoid possible leakage mechanisms. Indeed, regular maintenance and checking of the tanks buried into the soil is hardly observed, since these structures are located in a limited access area. This research aimed the understanding of the process in which soil contamination takes place when in contact with gasoline. Simulations in the laboratory were carried out for a soil from the Federal District, taking into account the variation of time. For the aforementioned process, soil specimens were compacted following the ABNT standards, and they were later on submitted to the action of this aggressive fluid. To evaluate the contamination results, tests were performed before and after the soil specimens were affected by the gasoline. Additional chemical analyses were also performed. It was observed that changes do occur in the soil when in contact with gasoline, which has also identified variations in the organic matter throughout the chemical test results. Also changes in the air voids of the soil for varying periods of contamination were once again observed when compared to the results of the samples prior to contact with the fluid.

Key words: soil, contamination, gasoline.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes tipos de curvas de distribuição granulométrica	22
Figura 2 - Gráfico Tensão X Deformação	23
Figura 3 – Principais fontes de contaminação no estado de São Paulo	33
Figura 4 - Diferentes fases presentes nas zonas saturadas e insaturadas	40
Figura 5 - Evolução da contaminação por hidrocarbonetos de combustíveis em sub superfície	41
Figura 6 - Localização da Amostra de Solo	48
Figura 7 - Ensaio para Determinação do Limite de Liquidez	50
Figura 8 - Aparelho de Casagrande com Ranhura no Solo.....	50
Figura 9 - Molde de Rolinho no ensaio de Limite de Plasticidade.....	52
Figura 10 - Peneiramento com Agitador Mecânico (Peneirador Mecânico).....	54
Figura 11 - Dispensor Automático.....	55
Figura 12 - Leituras do Densímetro para Ensaio de Sedimentação Com e Sem Agente Defloculante.....	56
Figura 13 - Volume dos Picnômetros Preenchidos com Água Destilada.....	57
Figura 14 - Aferição Temperatura dos Picnômetros para Determinação do Gs	57
Figura 15 – Compactação do Corpo de Prova.....	59
Figura 16 – Contaminação por Gotejamento	61
Figura 17 – Equipamento hospitalar danificado pelo fluido agressivo.....	61
Figura 18 - Ambiente sinalizado e ventilado	62
Figura 19 – Molde do solo no anel de adensamento	64
Figura 20 – Célula de adensamento desmontada	65
Figura 21 – Equipamento de adensamento com célula e carga acionada.....	65
Figura 22 – Curva granulométrica	69
Figura 23 – Curva de compressibilidade comparativa entre amostra natural e contaminada por 02 semanas	71
Figura 24 – Curva de compressibilidade comparativa entre amostra natural e contaminada por 01 mês.....	72
Figura 25 – Curva de compressibilidade comparativa entre amostra natural e contaminada por 02 meses	73

Figura 26 – Curva de compressibilidade comparativa entre amostra natural e contaminada por 03 meses74

Figura 27 – Curva de compressibilidade comparativa entre amostra natural e contaminada por 04 meses75

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 01 – Determinação do Índice de Plasticidade	24
Equação 02 – Determinação de umidade.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores indicativos dos tipos de solos segundo Gs.....	20
Tabela 2 – Qualificação dos valores de índice de plasticidade	25
Tabela 3 – Tabela de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas no nível de intervenção e risco de toxidade dos BTEX	32
Tabela 4 – Parâmetros quanto aos teores de cálcio e magnésio	43
Tabela 5 – . Parâmetros quanto aos teores de potássio e sódio no solo	43
Tabela 6 – Parâmetros quanto aos teores de acidez total e alumínio no solo.....	43
Tabela 7 - Parâmetros quanto aos teores de fósforo no solo para sistema sequeiro.....	44
Tabela 8 – Parâmetros quanto aos teores de matéria orgânica no solo	44
Tabela 9 - Normas Técnicas da ABNT destinadas à projetos de postos de combustíveis...	45
Tabela 10 – Normas Técnicas da ABNT para caracterização e adensamento do solo	47
Tabela 11 – Resultados para a determinação do Gs	67
Tabela 12 – Granulometria: percentual da composição do solo	68
Tabela 13 – Parâmetros do teor de fósforo de acordo com a quantidade de argila no solo.	76
Tabela 14 – Parâmetros dos teores de cálcio e magnésio de acordo com a quantidade de argila no solo	76
Tabela 15 – Parâmetros dos teores de matéria orgânica de acordo com a quantidade de argila no solo	77
Tabela 16 – Composição granulométrica do solo natural segundo análise química	77
Tabela 17 – Comparativo da quantidade de fósforo presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	78
Tabela 18 – Comparativo da quantidade de cálcio e magnésio presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	79
Tabela 19 – Comparativo da quantidade de potássio e sódio presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	80
Tabela 20 – Comparativo da acidez total e alumínio presentes nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	80
Tabela 21 – Comparativo da quantidade de matéria orgânica presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	81
Tabela 22 – Comparativo da quantidade de fósforo presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos	82

Tabela 23 – Comparativo da quantidade de cálcio e magnésio presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos82

Tabela 24 – Comparativo da quantidade de potássio e sódio presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos82

Tabela 25 – Comparativo da acidez total e alumínio presentes nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos83

Tabela 26 – Comparativo da quantidade de matéria orgânica presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos84

ÍNDICE DE SIMBOLOS

ε	Deformação
δ	Tensão
U_z	Grau de Adensamento
H_2O	Água
P	Fósforo
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
K	Potássio
Na	Sódio
Al	Alumínio
$ISNa$	Saturação em Sódio
G_s	Peso Específico
γ_d	Massa Específica Aparente Seca
kPa	Quilopascal
e	Índice de Vazios

ÍNDICE DE ABREVIATÓES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CP	Corpo de Prova
W	Umidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
pH	Potencial Hidrogeniônico
MO	Matéria Orgânica
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CETESB.....	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
FLNA	Fase Líquida Não Aquosa
FLNAL	Fase Líquida Não Aquosa Leve

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivo Específico	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Solos.....	18
3.1.1 Classificação dos Solos	18
3.1.2 Solos Lateríticos	20
3.2 Caracterização dos Solos	20
3.2.1 Granulometria dos Solos.....	20
3.2.2 Limites de Consistência do Solo	22
3.3 Compactação dos Solos	25
3.4 Adensamento dos Solos	26
3.5 Capilaridade nos Solos	30
3.6 Contaminação dos Solos	30
3.6.1 Contaminação dos Solos por Hidrocarbonetos da Gasolina.....	30
3.6.1.1 Etapas da Contaminação do Solo por Hidrocarbonetos	32
3.6.1.2 Mecanismos de Transportes de Contaminantes.....	36
3.6.1.3 Matéria Orgânica no Solo	37
3.6.1.4 Hidrocarbonetos de Gasolina no Solo	38
3.7 Ensaios e Parâmetros para Análise Química dos Solos	42
3.8 Armazenamento em Postos de Gasolina (Tanques)	44
4. METODOLOGIA DE TRABALHO	47
4.1. Coleta do Solo	48
4.2 Ensaios de Caracterização	49
4.2.1 Índices de Consistência	49
4.2.1.1 Limite de Liquidez (LL)	49

4.2.1.2 Limite de Plasticidade (LP)	51
4.2.1.3 Índice de Plasticidade (IP)	53
4.2.2 Granulometria	53
4.2.2.1 Sedimentação.....	54
4.2.3 Peso Específico Relativo dos Grãos (Gs)	56
4.3 Preparação e Contaminação dos Corpos de Prova.....	58
4.3.1 Compactação dos Corpos de Prova.....	60
4.3.2 Contaminação dos Solos com Gasolina	60
4.3.2.1 Tempos de Contaminação	62.
4.4 Adensamento dos Corpos de Prova.....	63
4.5 Análise Química	66
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
5.1 Índices de Consistência do Solo	67
5.2 Peso Específico dos Grãos (Gs)	67
5.3 Ensaio de Adensamento do Solo	69
5.4 Análise Química do Solo	76
5.4.1 Análise Química do Solo Contaminado Durante 02 Meses	77
5.4.2 Análise Química do Solo Contaminado Durante 04 Meses	81
6. CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXO I	90
ANEXO II	91

1. INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por meio de gasolina, em circunstâncias reais, pode acontecer por meio de possíveis vazamentos nos reservatórios enterrados de postos de combustível, assim como por acidentes no transporte do fluido, fazendo com que ocorra vazamento e a gasolina entre em contato direto com o solo, podendo chegar inclusive, até o lençol freático.

Quando o combustível atinge o solo, seus componentes separam-se em geral em três fases: dissolvida, líquida e gasosa. Uma parte da gasolina é dissolvida no lençol freático, outra parte tende a ocupar os espaços vazios do solo e a terceira evapora no meio ambiente. Logo, pode-se afirmar que a contaminação atinge: solo, as águas subterrâneas e a atmosfera.

Segundo MARIANO (2006), devido as diversas esferas de contaminação mencionadas, tornam-se complexas a tarefa de avaliação da extensão, dinâmica, concentração das contaminações, análise de riscos e possíveis estratégias de remediação.

Os problemas relacionados à gravidade da contaminação por meio de derivados do petróleo não param por aí. Em geral, os hidrocarbonetos que compõem a gasolina são pouco solúveis e possuem pouca persistência no solo. Além disso, hidrocarbonetos monoaromáticos conhecidos como BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) são os compostos que apresentam maior solubilidade em água, sendo, portanto, os maiores potenciais contaminantes de lençol freático. Os citados compostos possuem diferentes níveis de toxicidade e oferecem riscos à saúde humana. Conforme PENNER (2000) citado por MARIANO (2006), em caso de exposição ao benzeno, o mais tóxico deles, por exemplo, pode acarretar distúrbios no sistema nervoso central, leucopenia ou até mesmo câncer.

SANTOS (2009), baseada na Resolução do CONAMA 273 de 29 de novembro de 2000, levanta as seguintes considerações: a) toda instalação e sistemas de armazenamento de derivados do petróleo e outros combustíveis, configuram-se como

empreendimentos potencialmente ou parcialmente poluidores e geradores de acidentes ambientais; b) os vazamentos de derivados de petróleo e outros combustíveis podem causar contaminação de corpos d'água subterrâneos e superficiais, do solo e do ar.; c) os riscos de incêndio e explosões, decorrentes desses vazamentos, principalmente, pelo fato de que partes desses estabelecimentos localizam-se em áreas densamente povoadas; d) a ocorrência de vazamentos vem aumentando significativamente nos últimos anos em função da inadequada manutenção ou insuficiente, da obsolescência do sistema e equipamentos e da falta de treinamento de pessoal; e) a ausência e/ou uso inadequado de sistemas confiáveis para a detecção de vazamento; f) a insuficiência e ineficácia de capacidade de resposta frente a essas ocorrências e em alguns casos, a dificuldade de implementar as ações necessárias; torna obrigatório o prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente da localização, construção, instalação, modificação, ampliação e operação de postos revendedores.

Segundo estudos realizados por DUARTE (2003) citado por SANTOS (2009), em 260 postos de combustíveis do Distrito Federal foi verificado que 51% dos tanques de armazenamento foram construídos em aço sem revestimento, ou seja, sem proteção contra corrosão; 41,5% desses estavam instalados há mais de 10 anos e desses (14,2%) há mais de 20 anos. Do total pesquisado, 59% apresentavam sérios problemas no sistema de armazenamento e 18% ameaçavam diretamente o meio ambiente por estarem em local onde qualquer vazamento poderia atingir as águas subterrâneas.

Vazamentos em tanques de combustíveis enterrados foram observados em todo o mundo com frequência a partir do final da década de 1980, visto que muitos tanques foram instalados ao final da década de 1960 e ao longo da década de 1970, sendo sua vida útil de cerca de 25 anos. Vazamentos têm sido detectados também em refinarias e em atividades de exploração. (SCHMIDT, 2010)

Tendo em vista os dados supramencionados, percebe-se a importância do tema abordado nesta pesquisa. O trabalho é composto por uma revisão bibliográfica na qual são apresentados conceitos relacionados à classificação, caracterização,

compactação e adensamento dos solos, assim como tópicos sobre a contaminação de solos por hidrocarbonetos da gasolina comum (etapas e mecanismos), matéria orgânica no solo, parâmetros para análise química das amostras e armazenamento do combustível em postos de distribuição. Seguidos de matérias e métodos utilizados na pesquisa e apresentação dos resultados. Ressalta-se ainda as considerações do trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo simular em laboratório a contaminação de um solo residual de Brasília-DF em contato com gasolina comum, com o intuito de comparar físico e quimicamente amostras virgens e contaminadas.

2.2 Objetivo Específico

- Analisar o comportamento do solo virgem e do solo contaminado com gasolina comum por meio de ensaio de adensamento;
- Analisar quimicamente as amostras de solo virgem e contaminado com gasolina comum;
- Comparar todos os resultados das amostras virgens e contaminadas por variados períodos de tempo;
- Propor uma solução técnica quanto à proteção do solo para evitar possíveis contaminações dos solos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Solos

Solos são elementos presentes na superfície terrestre formados a partir da decomposição de rochas e que suportam o crescimento de vegetais terrestres em sua superfície. Seu processo de formação é lento e constante, e depende de agentes físicos (intempéries, variação de temperatura, entre outros) e químicos (reação dessas partículas em contato com outros elementos, como a água ou matéria orgânica, por exemplo).

Os solos são constituídos basicamente de quatro elementos: matéria orgânica, matéria mineral, umidade e vazios.

Os processos pedogênicos fundamentais de adição, remoção, translocação e transformações de caráter físico, químico e biológico originam *solum e seus* respectivos horizontes, os quais apresentam variações para um mesmo tipo de material de origem, tal variabilidade decorre de diferenças ambientais. Em função de fatores ambientais, tais processos pedogenéticos sofrem variações em sua ação isolada e/ou combinada, em consequência da atuação de cinco processos pedogenéticos de pedogênese conhecidos como: laterização, podzolização, calcificação, gleização e salinização, os quais decorrem especialmente pela ação diferenciada de clima (Popp, 2010).

3.1.1 Classificação dos Solos

Segundo Pinto (2006), a primeira característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem. Numa primeira aproximação, pode-se identificar que alguns solos possuem grãos perceptíveis a olho nu, como os grãos de pedregulho ou a areia do mar, e que outros têm os grãos tão finos que, quando

molhados, se transformam numa pasta (barro), e não se pode visualizar as partículas individualmente.

Os solos podem ser classificados por meio de vários parâmetros e de acordo com as diversas áreas de interesse na engenharia. No âmbito da geotecnia pode-se citar dois sistemas de classificação de solos, ambos baseados na granulometria e nos limites de Atterberg.

O primeiro sistema de classificação é da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Foi desenvolvido em 1929 nos Estados Unidos e segue os critérios de tamanho dos grãos, a plasticidade e a presença de pedras. Apesar de simples e eficiente, esse sistema é utilizado em sua maioria por departamentos rodoviários nos Estados Unidos. Portanto, sua utilização não foi relevante para este trabalho.

O outro processo de classificação denominado Sistema Unificado de Classificação de Solos, proposto por Casagrande em 1942, foi adotado como base para classificar as amostras de solo para esta pesquisa.

De acordo com o tamanho das partículas encontradas no solo, pode-se classifica-lo como pedregulhos, areia, silte ou argila. A composição dificilmente será puramente de cada tipo de grão, então se classifica de acordo com o tamanho predominante das partículas presentes.

O peso específico relativo dos solos (G_s) é um importante dado para diversos cálculos na mecânica dos solos. Trata-se da razão entre o peso específico de determinado material e o peso específico da água. O valor do G_s é determinado em ensaios de laboratório. Segundo DAS (2011), esses valores estão normalmente no intervalo entre 2,6 à 2,9. O peso específico dos sólidos de uma areia de cor clara, composta principalmente por quartzo, pode ser estimada em cerca de 2,65; para solos como argila e silte, esse valor pode variar de 2,6 à 2,9. A Tabela 1 classifica o solo quanto à sua constituição orgânica de acordo com o valor do G_s .

Tabela 1 – Valores indicativos dos tipos de solos segundo Gs

$2,9 < G_s$	Solo Inorgânico contendo ferro
$2,6 < G_s < 2,8$	Solo Inorgânico
$G_s < 2,5$	Solo Orgânico
$G_s < 2,2$	Solo Essencialmente orgânico (Turfa)

3.1.2 Solos lateríticos

Solos lateríticos são encontrados em zonas tropicais, quente e úmidas, devido à presença de chuvas moderadas a intensas. É possível fazer identificação visual deste solo, uma vez que apresenta alta concentração de minerais como Ferro e Alumínio que, quando oxidados, possuem coloração tipicamente avermelhada. Tem-se, portanto, o CO_2 como o principal agente da laterização.

Na natureza, os solos lateríticos apresentam-se, geralmente, não saturados, com índice de vazios elevado, daí sua pequena capacidade de suporte. Quando compactados, sua capacidade de suporte é elevada, e por isto são muito empregados em pavimentação e em aterros. Após compactado, um solo laterítico apresenta contração se o teor de umidade diminuir, mas não apresenta expansão na presença de água (PINTO, 2006).

Esse tipo de solo apresenta especial interesse para a Engenharia, tendo em vista que pode ser utilizado em obras que carecem de solos com maiores resistências e menores deformabilidades quando compactados.

3.2 Caracterização dos solos

3.2.1 Granulometria dos Solos

Análise granulométrica é a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como uma porcentagem do peso seco total. Em geral, são utilizados dois métodos para encontrar a distribuição do tamanho dos grãos do solo:

- (1) ensaio de peneiramento - para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm;
 - (2) ensaio de sedimentação - para partículas com diâmetros menores que 0,075 mm.
- (DAS, 2011).

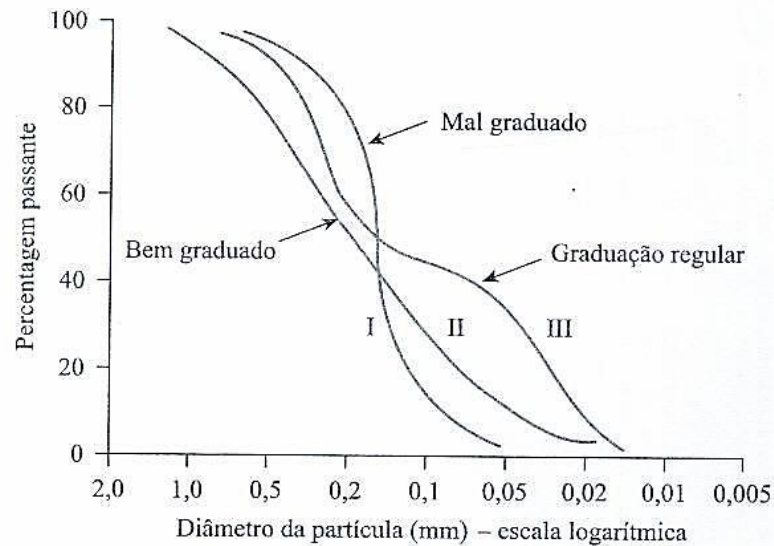
O ensaio de peneiramento é relativamente simples e é realizado em laboratório. Agita-se manual ou mecanicamente uma dada amostra de solo sobre peneiras empilhadas em ordem progressiva do tamanho de suas malhas. A peneira com maior abertura fica no topo e a mais fina (0,075mm), na base, acima somente da tampa, ou fundo. O solo deve ser previamente seco em estufa e devidamente destorroado.

Ao final do peneiramento determina-se a massa retida em cada peneira. Este ensaio deve seguir a norma NBR. 7181/84

Como o nome sugere, o ensaio de sedimentação para a determinação da granulometria da fração fina do solo é baseado no princípio da sedimentação dos grãos. Estes, quando em contato com a água, se sedimentam em velocidades diferentes. O ensaio consiste em colocar certa quantidade de amostra previamente seca em estufa, em uma proveta, juntamente com água destilada e agente defloculante. Com o auxílio de um densímetro, é medida a quantidade de solo em suspensão em um determinado tempo t e em uma profundidade L . Segundo DAS (2011), o peso específico é uma função da quantidade de partículas de solo presentes por volume de suspensão àquela profundidade. Estes procedimentos também são regidos pela norma NBR 7181/84.

Geralmente, os valores encontrados em ambos os ensaios são compilados em um gráfico conhecido como curva de distribuição granulométrica. Além do tamanho das partículas presentes no solo, a citada curva mostra o tipo de distribuição de diversos tamanhos. A Figura 1 mostra as diferentes curvas granulométricas, que enquadram os diferentes tamanhos de grãos dos solos.

Figura 1 – Diferentes tipos de curvas de distribuição granulométrica



Fonte: DAS (2011), pág. 36.

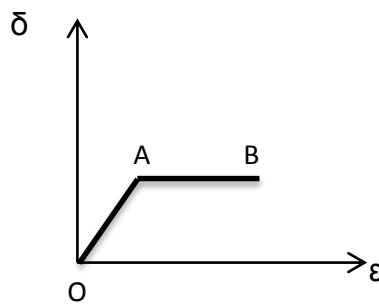
Segundo DAS (2011), a curva I representa um tipo de solo no qual a maioria dos grãos de solo possui o mesmo tamanho chamado solo mal graduado ou uniforme. A curva II representa um solo no qual os tamanhos das partículas são distribuídos em uma ampla faixa, chamado bem graduado ou desuniforme. Um solo bem graduado possui um coeficiente de uniformidade maior que cerca de 4 para pedregulhos e 6 para areias, e um coeficiente de curvatura entre 1 e 3 (para pedregulhos e areias). Um solo pode ter uma combinação de duas ou mais frações com granulação uniforme. A curva III representa esse tipo de solo, chamado granulometria descontinua.

3.2.2 Limites de Consistência dos Solos

Segundo CAPUTO (1990), a plasticidade trata-se de uma propriedade dos solos, que consiste na maior ou menor capacidade dele ser moldado dependendo de determinadas condições de umidade, sem variação de volume. Trata-se de uma das mais importantes propriedades das argilas.

A determinação da plasticidade dos materiais se dá através da relação entre tensão (δ) X deformação (ϵ), estabelecida através de um gráfico definido pela Teoria da Plasticidade (Figura 2 - Gráfico Tensão X Deformação).

Figura 2 – Gráfico Tensão X Deformação



Fonte: CAPUTO (1990), pág. 53

O trecho OA deste gráfico corresponde à fase elástica, ou seja, fase em que o material pode recuperar a forma e volume originais após a aplicação e retirada da tensão. O trecho AB corresponde à fase plástica, que significa que o material não irá mais retomar sua forma original ao término da ação deformante.

Os limites de consistência do solo são parâmetros de umidade que determinam a mudança de estado físico dos solos. São três limites, sendo eles: Limite de liquidez, o qual determina o limite entre o estado líquido e o estado plástico; Limite de Plasticidade, entre o estado plástico e estado semi-sólido; e o Limite de Contração, que está entre o estado semi-sólido e o sólido. Porém, no presente trabalho só foram verificados através de ensaios os valores dos limites de Atterberg, ou seja, Limites de Liquidez e Plasticidade. O solo se divide nesses quatro estados básico devido ao teor de umidade presente. Por exemplo, se este for muito baixo, o solo comportar-se-á mais como sólido. Já se o teor for muito alto, poderá fluir como líquido.

Segundo CAPUTO (1990), a determinação do limite de liquidez (LL) é feita pelo aparelho de Casagrande, que consiste em um prato de latão, em forma de concha, sobre um suporte de ebonite; por meio de um excêntrico imprime-se ao prato,

repetidamente, quedas de altura de 1cm e intensidade constante. É recomendável que se encontre no mínimo 6 golpes, a fim de se obter a linha de escoamento ou curva de fluidez. Esse gráfico é traçado a partir da relação entre os valores de umidade encontrados do solo e do número de golpes dados até que a ranhura de solo no prato seja fechada.

DAS (2011) define Limite de Plasticidade (LP) como o percentual de umidade no qual o solo colapsa, quando moldados fios com 3,2mm de diâmetro. O limite de plasticidade é o limite inferior do intervalo plástico do solo.

De forma sucinta, o ensaio para a obtenção do LP consiste na rolagem de uma dada quantidade de amostra de solo devidamente úmida em uma placa de vidro, até que o “rolinho” atinja diâmetro e comprimento iguais a um gabarito e apareçam fissuras. O valor médio de umidade obtido através da secagem em estufa desses rolinhos é igual ao LP.

A determinação dos limites de consistência é básica para caracterização do solo e permite, com facilidade e pouca instrumentação, conhecer o tipo deste e suas propriedades. Os ensaios para a obtenção tanto do Limite de Liquidez (LL), quanto para Limite de Plasticidade (LP) são rotineiros nos laboratórios de Mecânica dos Solos. O processo de ambos os ensaios será descrito de forma detalhada no Capítulo 4, Materiais e Metodologia do Trabalho, pois foram realizados nesta pesquisa para caracterização do solo analisado.

O índice de plasticidade (IP) é obtido através da subtração do valor de LL pelo valor de LP, como indicado na Equação 1 a seguir:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

DAS (2011), citando BURMISTER (1949), apresenta a Tabela 2 que qualifica os valores de IP para caracterização do solo.

Tabela 2 – Qualificação dos valores de índice de plasticidade

IP	DESCRIÇÃO
0	Não Plástico
1 - 5	Ligeiramente Plástico
5 - 10	Plasticidade baixa
10 - 20	Plasticidade média
20 - 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

(Fonte: DAS, 2011, pág. 69)

3.3 Compactação dos Solos

Em obras de Engenharia é necessário aumentar o peso específico dos solos soltos através da compactação. Na prática, esse processo aumenta a resistência do solo e, conseqüentemente, também da fundação que suportará toda a carga da obra construída, além de reduzir recalques diferenciais e aumentar a estabilidade de taludes e aterros.

DAS (2011) define compactação como sendo o processo de densificação do solo por meio da remoção do ar, o que requer energia mecânica e o grau de compactação do solo é medido com base no seu peso seco.

A água é fundamental no processo de compactação, pois, quando adicionada gradativamente, atua como agente amolecedor das partículas de solo, que se ajustam umas com as outras de forma compacta de alta densidade. Logo após a compactação o peso específico seco aumenta conforme aumenta o teor de umidade. Porém, a partir de um determinado teor de umidade, qualquer aumento deste teor irá resultar na redução do peso específico seco. Isso ocorre porque as partículas d'água passam a ocupar o espaço de partículas sólidas. Sendo assim, o teor de umidade para o peso específico seco máximo (antes de começar a reduzir) é denominado de teor de umidade ótimo ou umidade ótima.

A compactação em campo se dá por meio do uso de máquinas como rolos compactadores lisos, pé-de-carneiro, de pneus de borracha e vibratórios. Já em laboratório acontece, geralmente, pelo *ensaio de compactação Proctor*.

O citado ensaio é regido pela norma NBR 7182/86, Solo - Ensaio de compactação. É possível realiza-lo utilizando diferentes energias de compactação: normal, intermediária e modificada. O ensaio Proctor normal foi realizado na presente pesquisa.

3.4 Adensamento dos Solos

Quando ocorre um aumento de pressão em uma camada de solo saturado, a poropressão da água é aumentada repentinamente, ou seja, há uma expulsão das moléculas de água do interior dos vazios do solo. Em solos arenosos bastante permeáveis, essa drenagem vertical pode ocorrer imediatamente. Além da drenagem, o aumento da poropressão resulta em recalque.

Quando uma camada de argila saturada compressível é submetida a um aumento de tensão, o recalque elástico ocorre imediatamente. Como a condutividade hidráulica da argila é significativamente menor que a da areia, o excesso de poropressão da água gerado pela carga gradativamente se dissipa durante um longo período. Portanto, a alteração do volume associado (ou seja, o adensamento) na argila pode continuar ocorrendo depois do recalque elástico. O recalque causado por adensamento na argila pode ser muitas vezes maior que o recalque elástico. (DAS, 2011)

Terzaghi, considerado o pai da mecânica dos solos, desenvolveu a Teoria do Adensamento. A citada teoria explica como ocorre a transferência de pressão neutra para a estrutura sólida do solo, e a consequente redução de volume deste.

Como demonstrado em Pinto (2006), a Teoria do Adensamento baseia-se nas seguintes hipóteses:

- 1) O solo é totalmente saturado;
- 2) A compressão é unidimensional;
- 3) O fluxo d'água é unidimensional;
- 4) O solo é homogêneo;
- 5) As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do solo;
- 6) O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de partículas e vazios;
- 7) O fluxo é governado pela Lei de Darcy;
- 8) As propriedades do solo não variam no processo de adensamento;
- 9) O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva durante o processo de adensamento.

Exceto a oito e a nove, as demais hipóteses são plausíveis e aceitáveis. Entretanto, a hipótese oito, onde Terzaghi considera inalteráveis as propriedades do solo durante o processo de adensamento, não se verifica. Pois, por exemplo, a permeabilidade do solo diminui. E no que diz respeito à hipótese nove, trata-se de uma aproximação da realidade para simplificar o problema matemático. Na realidade, o índice de vazios varia não linearmente com o aumento das tensões efetivas.

O parâmetro mais importante da teoria de Terzagui é o *grau de adensamento* (U_z), dado em porcentagem que, segundo Pinto (2006), define-se como a relação entre a deformação ocorrida num elemento, numa certa posição, caracterizada pela sua profundidade z , num determinado tempo (ϵ) e a deformação desse elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (ϵ_f).

Segundo CAPUTO (1990), o ensaio de adensamento tem por objetivo a determinação experimental das características do solo que interessam à determinação dos recalques provocados pelo adensamento.

O ensaio, realizado em laboratório, consiste na colocação de um corpo de prova de solo, moldado em um anel metálico entre duas pedras porosas, em um aparelho chamado edômetro. O citado aparelho é equipado com um extensômetro micrométrico, que mede a deformação do solo durante a aplicação de carga. A carga é adicionada gradativamente a cada vinte e quatro horas e quando atinge a carga máxima desejada, é feito o descarregamento, também gradual.

Os resultados do ensaio de adensamento são expressos em um gráfico conhecido como curva de compressibilidade, no qual é possível observar três fases distintas após o término do ensaio. DAS (2011) as descreve da seguinte forma:

Estágio I: Compressão inicial, causada principalmente pelo pré- carregamento;

Estágio II: Adensamento primário, durante o qual o excesso de poropressão é gradualmente transferido para a tensão efetiva devido à expulsão dessa água dos poros;

Estágio III: Compressão secundária, que ocorre após a dissipação completa do excesso de poropressão, quando alguma deformação do corpo de prova acontece devido ao reajuste plástico da estrutura do solo.

Taylor apresentou uma forma simples de entendimento da Teoria de Terzaghi. Trata-se de uma analogia da estrutura sólida do solo com uma mola, cuja deformação é proporcional à carga aplicada. Segundo Pinto (2006), o solo saturado seria representado por uma mola dentro de um pistão cheio de água, no êmbolo do qual existe um orifício de reduzida dimensão pelo qual a água só passa lentamente (a pequena dimensão do orifício representa a baixa permeabilidade do solo).

Quando a carga é aplicada ao pistão, quem primeiro a absorve é a água, por ser bem menos compreensível que a mola, que não se deforma até que a água comece a sair. Ocorre a expulsão da água, pois o exterior está submetido à pressão atmosférica. A medida que o citado fluido vai saindo, a mola vai se deformando, pois ocorre a transição gradativa de carga da água antes presente para a mola.

Na prática, seja no campo ou em laboratório, ocorre a mesma coisa. Quando é acrescentada carga, no primeiro momento, quem suporta a pressão é a água presente nos vazios do solo. Segundo PINTO, (2006), a pressão neutra aumenta, de um valor igual ao acréscimo de pressão aplicada, enquanto a tensão efetiva não se altera. A esse aumento de pressão neutra dá-se o nome de sobrepressão, por ser a parcela da pressão neutra acima da pressão neutra preexistente, devido à profundidade em relação ao lençol freático. Nesse instante, não há deformação do solo, pois só variações de tensões efetivas provocam deformações do solo (como as cargas suportadas pela mola, na analogia, provocam deformações da mola).

Com a água em carga superior à que estabeleceria equilíbrio com o meio externo, ocorre percolação da água em direção às áreas mais permeáveis (pedra porosa, no ensaio, ou camadas de areia, no solo). A saída da água indica uma redução do índice de vazios, ou seja, uma deformação da estrutura sólida do solo. Consequentemente, parte da pressão aplicada passa a ser suportada pelo solo; logo, há um aumento da tensão efetiva. Em qualquer instante, a soma do acréscimo de tensão efetiva com a sobrepressão neutra é igual ao acréscimo de pressão total aplicada. Como na analogia mecânica, o processo continua até que toda a pressão aplicada tenha se tornado acréscimo de tensão efetiva e a sobrepressão neutra tenha se dissipado. (PINTO, 2006)

O índice de vazios (e) é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos do solo. Este valor é apresentado pela curva de compressibilidade, gerada em função de e e das diferentes cargas aplicada no ensaio de adensamento. No presente trabalho foram avaliadas as variações dos índices de vazios presentes nas amostras de solo contaminadas com gasolina comum e comparadas com o índice presente na amostra natural, antes da contaminação.

3.5 Capilaridade nos Solos

Capilaridade é um fenômeno físico observado entre fluidos e partículas sólidas. O citado fenômeno trata-se de uma tendência de elevação da água por entre os vazios presentes nas partículas sólidas.

O termo capilaridade assim foi denominado pois foi primeiro observado em laboratório, onde a água subia em tubos de bitolas extremamente pequenas, comparadas à espessura de fios de cabelo (do latim, *capillus*).

Esse fenômeno é mais comumente relatado quando a água é o fluido em questão. Porém, no presente trabalho contaminou-se os corpos de prova por meio de capilaridade no qual o fluido foi a gasolina comum.

3.6 Contaminação dos solos

3.6.1 Contaminação dos Solos por Hidrocarbonetos da Gasolina

Qualquer substância que se encontra fora das condições consideradas normais no ambiente pode ser considerada como contaminante. Quando determinada substância contaminante oferece risco ao ambiente ou a saúde humana é então considerada poluente. O petróleo é, portanto, considerado contaminante por seu potencial contaminador do meio.

A gasolina é um derivado do petróleo, obtida nas refinarias através do processo de destilação fracionada à temperaturas de 40 à 200°. O citado combustível é composto por uma complexa mistura de arranjos entre átomos de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos), que variam de acordo com a composição da origem e dos aditivos adicionados para comercialização.

Os hidrocarbonetos na gasolina se dispõem, em geral, em cadeias de variadas estruturas, possuindo entre quatro e doze átomos de carbono. (HARRIS, WHITICAR & EEK, 1999 citados por FERREIRA 2010). Dentre os hidrocarbonetos, destacam-se

os compostos aromáticos ¹voláteis benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), pela sua elevada toxicidade à saúde humana atuando como, por exemplo, depressores do sistema nervoso central, agentes mutagênicos e carcinogênicos. Além disso, em relação aos demais hidrocarbonetos presentes na gasolina, os BTEX apresentam maior solubilidade em água, o que permite que, em casos de vazamento, esses compostos possam não só ser nocivos as atividades no solo, mas também comprometer a potabilidade das águas subterrâneas conforme os citados autores.

A Tabela 3 apresenta os valores relacionados a contaminação dos solos e das águas por gasolina. Assim como mostra ainda os níveis de toxicidade dos compostos do fluido. Percebe-se na Tabela que o componente mais agressivo corresponde ao benzeno, e que mesmo em pequenas quantidades quando comparado com os demais componentes causa danos sérios a saúde humana, podendo causar câncer.

Alguns dos hidrocarbonetos constituintes da gasolina apresentam baixos pontos de ebulição, podendo passar para a fase gasosa à temperatura ambiente. Além da perda de parte do combustível, a volatilização gera poluição atmosférica. (FERREIRA, 2010).

A transferência dos BTEX para a fase gasosa pode ser potencializada pela presença de alcoóis. Nesse caso, a gasolina brasileira pelo seu conteúdo de etanol aumenta as chances de volatilização desses compostos e, conseqüentemente, aumenta os danos à saúde humana (CORSEUIL & FERNANDES, 1999; NIVEN, 2005, citados por FERREIRA, 2010)

¹ Hidrocarboneto Aromático: apresenta como cadeia principal ou mais anéis benzênicos (Fonte: Wikipedia, 04/11/2013 às 14h:32min)

Tabela 3 - Tabela de valores orientadores para solos e para águas subterrâneas no nível de intervenção e risco de toxicidade dos BTEX.

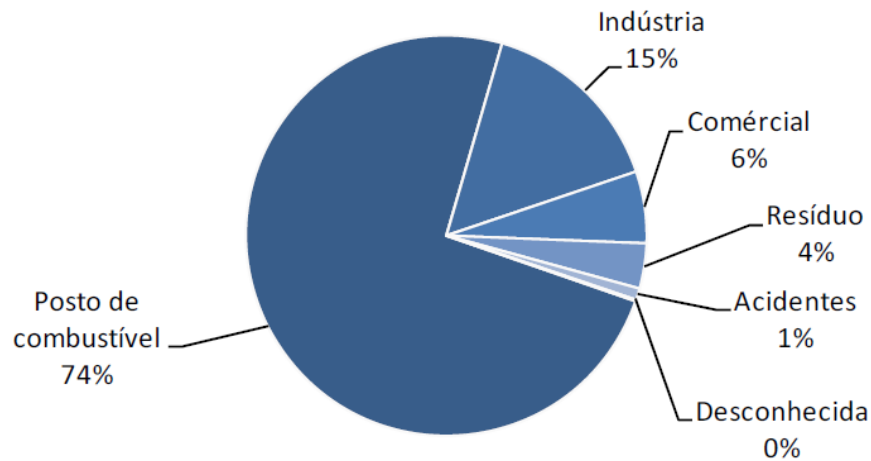
Compostos	Solos área Residencial (mg.kg⁻¹)	Solos área Industrial (mg.kg⁻¹)	Águas Subterrâneas (µg.L⁻¹)	Risco e Toxicidade
Benzeno	1,5	3,0	5 ⁽¹⁾	Pode causar câncer Altamente inflamável Afeta sistema nervoso central Tóxico a inalação, contato dérmico, por ingestão.
Tolueno	40	140	170 ⁽²⁾	Altamente inflamável Tóxico por inalação, irritante para a pele Afeta sistema nervoso central
Etilbenzeno	—	—	—	Altamente inflamável Irritante para o sistema respiratório e para a pele Afeta sistema nervoso central
Xilenos (soma)	6,0	15	300 ⁽¹⁾	Inflamável Perigoso a inalação e a derme Afeta sistema nervoso central

(Fonte: FARIAS, 2003)

3.6.1.1 Etapas da Contaminação do Solo por Hidrocarbonetos

Ferreira (2010) citando dados da CETESB (2005; 2006), afirma que um levantamento realizado na cidade de São Paulo mostrou que os postos de combustíveis são as maiores fontes de poluição, sobretudo através de vazamentos em tanques de armazenamento (enterrados ou não) e em tubulações (Figura 3). Sendo que 74% desses vazamentos ocorreram com gasolina comum atuando como fluido contaminante.

Figura 3 – Principais fontes de contaminação no estado de São Paulo



Fonte: CETESB (2006), citada por FERREIRA (2010)

Segundo MERCER e COHEB (1990), normalmente, um vazamento de combustível em um tanque de abastecimento promove diferentes fases de contaminação. AZAMBUJA (2000), baseando-se em trabalhos experimentais de SAUCK (2000), descreve essas cinco fases da seguinte forma:

a) Fase livre

Fase constituída apenas por hidrocarbonetos, trata-se de um véu sobre o topo do lençol freático livre e que, dependendo da quantidade de fluido derramado e da dinâmica do sistema freático, pode ser mais ou menos espesso. Estudos demonstram que apenas 50% dos vazios do solo são ocupados por hidrocarbonetos, sendo que a outra metade é ocupada por água e ar. Esse percentual de hidrocarbonetos presente nos vazios dos solos não é tão constante, admitindo-se que ele seja menor nas bordas superior e inferior dessa camada. Por essa razão, não existe um limite estrito entre a fase livre e as demais fases, mas uma banda de transição que pode ser mais ou menos espessa, de acordo com a viscosidade do hidrocarboneto, magnitude e frequência das oscilações freáticas, quantidade de oxigênio disponível, porosidade do solo, tempo transcorrido desde o vazamento, entre outros fatores intervenientes.

b) Fase adsorvida ou residual

Fase caracterizada por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo grumos de solo ou descontinuidades existentes no saprólito ou rocha, sendo mais importante para os produtos mais viscosos como o diesel. Devido às variações freáticas inerentes, essa fase ocupa uma banda sobre o topo da fase livre. Os hidrocarbonetos mais viscosos possuem maior mobilidade no solo durante a drenagem do que durante a saturação, o que resulta em um abandono de hidrocarbonetos no solo durante as oscilações do freático.

c) Fase dissolvida

Fase mais importante para fluidos menos viscosos como a gasolina, trata-se da contaminação por dissolução de aditivos polares e por uma fração emulsionada de hidrocarbonetos que possui maior mobilidade e dissipa-se abaixo do nível freático livre. A quantidade de hidrocarbonetos dissolvidos depende das condições de degradação (ou bioconversão) do produto, estando muito mais relacionada à participação da fase adsorvida e muito menos ligada à espessura da fase livre propriamente dita. Aliás, fases livres menos espessas devem favorecer a dissolução de componentes, porque o ambiente ideal para a ocorrência do fenômeno deve ser oxigenado e com pH mais baixo. Convém destacar que, como o ambiente anóxico² inibe a dissolução de hidrocarbonetos, a fase dissolvida ocupa apenas a parte superior dos aquíferos e raramente ultrapassa 5 metros de espessura abaixo do freático.

d) Fase vaporizada

Constitui uma fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de

² Ambiente anóxico: ambiente onde não há presença de oxigênio. (Fonte: <http://pt.wiktionary.org>)

menor ponto de vaporização, como aqueles que compõe a gasolina. Na verdade, a fase gasosa dos hidrocarbonetos está presente em meio às demais fases, mas é mais significativa na zona vadosa³ do subsolo.

e) Fase condensada

Aparece mais tipicamente em áreas urbanas onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, caracterizando-se pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos. Na verdade é semelhante à fase adsorvida, porém com composição diferente do produto original em virtude do fracionamento seletivo da vaporização. É também uma fase com intensa bioconversão, manifestando-se degradada.

As fases adsorvidas e livre são as que apresentam maior relevância no que diz respeito à risco ambiental, sendo importante delimitá-las em caso de contaminação por combustíveis oriunda de posto de abastecimento. Ações de remediação também são mais efetivas para estas fases. Entretanto, segundo FARIAS (2003), a fase dissolvida possui em algumas situações um impacto ambiental igual ou até maior em relação às demais fases anteriormente citadas, considerando o risco que pode causar à vida humana e ao ecossistema.

3.6.1.2 Mecanismos de transporte de contaminantes

³ Zona vadosa: zona superficial do solo, em que os poros se encontram cheios de ar. (Fonte: Wikipédia. 21/11/2013, às 22:40)

Advecção, dispersão e atenuação são os mecanismos físicos que atuam na transferência de massa na contaminação dos solos. AZAMBUJA (2000), os descreve da seguinte forma:

a) Advecção

Consiste no mecanismo onde os contaminantes seguem coincidentemente com os vetores de fluxo e guardam uma relação direta com a velocidade de percolação no solo. É o mecanismo responsável pela formação e pela mobilização da fase livre de hidrocarbonetos.

b) Dispersão

É o mecanismo no qual ocorre a diminuição da concentração dos contaminantes no fluido e pode ocorrer através de dois processos: dispersão hidráulica⁴ e difusão molecular. A dispersão hidrodinâmica acontece pela restrição de fluxo nos poros do solo que gera redução de velocidade da percolação dos componentes mais viscosos. A difusão molecular é, intrinsecamente, um fenômeno de diluição de componentes solúveis e é o principal processo formador da fase dissolvida, responsável pela maior mobilidade dos contaminantes.

c) Atenuação

Consiste na redução de contaminantes transportados pela advecção ou diluição através de reações químicas ou físico-químicas. A atenuação química é mais intensa em solos com maior capacidade de troca catiônica e atua reduzindo componentes das fases livre e adsorvida. A atenuação química é mais intensa na região com maior disponibilidade de oxigênio. A atenuação físico-química é a

⁴ Dispersão Hidráulica: processo que permite a mistura de águas contaminadas com águas não contaminadas através do movimento advectivo. (Fonte: <http://porhi.wikipaces.com>)

responsável pela formação da fase adsorvida e consiste no aprisionamento de contaminantes que se aderem aos grãos do solo, sobretudo aos grumos de argilas com maior atividade.

3.6.1.3 Matéria Orgânica no Solo (MO)

A matéria orgânica é responsável tanto pela mobilidade quanto pela retenção de compostos do solo. Pode ser classificada como humificada, ou seja, há presença de húmus, ou não humificada. A citada substância é originada a partir da decomposição de plantas e resíduos de animais no solo com e sem a ação de micro-organismos. (FARIAS, 2003)

A matéria orgânica presente no solo pode influenciar a compactação de três formas: amortecendo o impacto aplicado durante a compactação, e, conseqüentemente, dissipando a energia então aplicada; absorção da umidade usada para a compactação pela MO; aumento da coesão das partículas de solo devido a presença de MO interagindo com estas partículas; e a redução da densidade do solo com presença de MO, devido à baixa densidade de mesma. A consequência dos citados fatores é o aumento do teor de umidade utilizado na compactação e a redução da densidade do solo compactado.

Essa aparente contradição é decorrente do fato da matéria orgânica estar associada a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo: a) aumento da força de ligação entre as partículas minerais e b) mudança no arranjo das partículas (porosidade) (EKWUE (1990); ZHANG (1994), HORN & LEBERT(1994, citados por BRAIDA (2004). O balanço entre esses dois efeitos, que, por sua vez, depende da origem, estado de decomposição, status químico da matéria orgânica, irá determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a matéria orgânica pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau de saturação de água. Segundo o supracitado autor, quando predominam os efeitos de redução da densidade, por aumento da porosidade, a resistência à compressão diminui.

Entretanto, a matéria orgânica produz aumento na resistência do solo à compressão, quando predomina o efeito de aumento dos parâmetros de cisalhamento, aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente e redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas, redução da densidade por efeito de diluição e aumento da elasticidade.

A matéria orgânica é definida em geral como sendo proveniente de raízes e/ou outros organismos vivos em decomposição. Para este estudo, a matéria orgânica foi observada nos ensaios químicos por causa da quantidade de carbono presente no solo após a contaminação, pois a gasolina comum em seu composto químico apresenta-se como uma cadeia de hidrogênio e carbono (hidrocarboneto).

3.6.1.4 Hidrocarbonetos da Gasolina no Solo

Segundo dados da EMBRAPA (1978), o latossolo do Distrito Federal, região do solo em análise na presente pesquisa, apesar de ser bastante poroso e permeável, possui grande percentual de argila em sua composição.

O comportamento da gasolina no meio poroso irá depender das propriedades químicas, da mineralogia e da matéria orgânica do solo (Hayden et al., 1997; Njoroge et al., 1998 citados por Farias 2003). Dessa forma, haverá diferentes possibilidades tanto de infiltração quanto de interação das partículas contaminantes com as partículas de solo. O fluxo dos produtos poderá se dar em: fluxo aquoso, quando o meio de transporte é a água e os produtos em estados líquido, sólido ou gasoso encontram-se dissolvidos na fase aquosa (compostos hidrofílicos); e fluxo não aquoso ou fluxo da fase líquida não aquosa (FLNA), que ocorre quando os produtos não são solúveis em água, formando uma bifase, onde os hidrocarbonetos são os produtos imiscíveis, ou seja, compostos hidrofóbicos (Rowe et al., 1995)

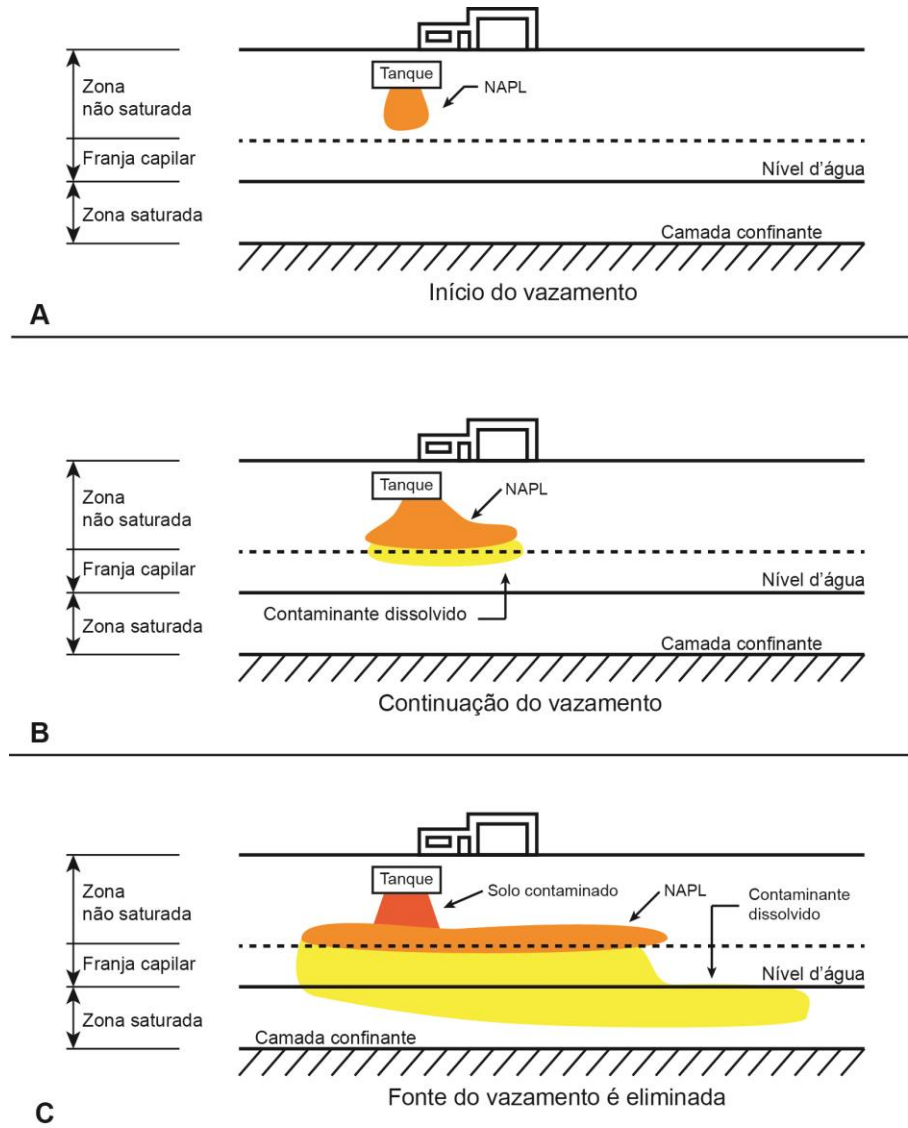
Como os componentes da gasolina são menos densos que água, são considerados compostos da fase líquida não aquosa leve (FLNAL). A fluidez dos

citados componentes nas zonas saturadas e não saturadas depende da quantidade de FLNAL.

Segundo FARIAS (2003), quando um volume pequeno de FLNAL flui pela zona não saturada, migra até atingir o estado de saturação residual (SR). Este estágio de SR é definido como o volume de hidrocarbonetos armazenados nos poros em relação ao volume total de poros. Como trata-se de zona não saturada e há pouca água, parte das substâncias contidas no fluido contaminante evapora facilmente, principalmente em regiões de temperaturas mais elevadas. Outra fração dos componentes que não é volatilizada fica adsorvida no solo, e quando chove ou ocorre flutuação do lençol freático, pode haver lixiviação⁵ da gasolina na matriz do solo. Os compostos mais solúveis como o benzeno, tolueno e xileno são transportados com maior facilidade até a zona saturada por estarem dissolvidos na água de infiltrações. Essas substâncias formam uma pluma de contaminantes, que se propaga por difusão e/ou advecção, conforme Figuras 4 e 5.

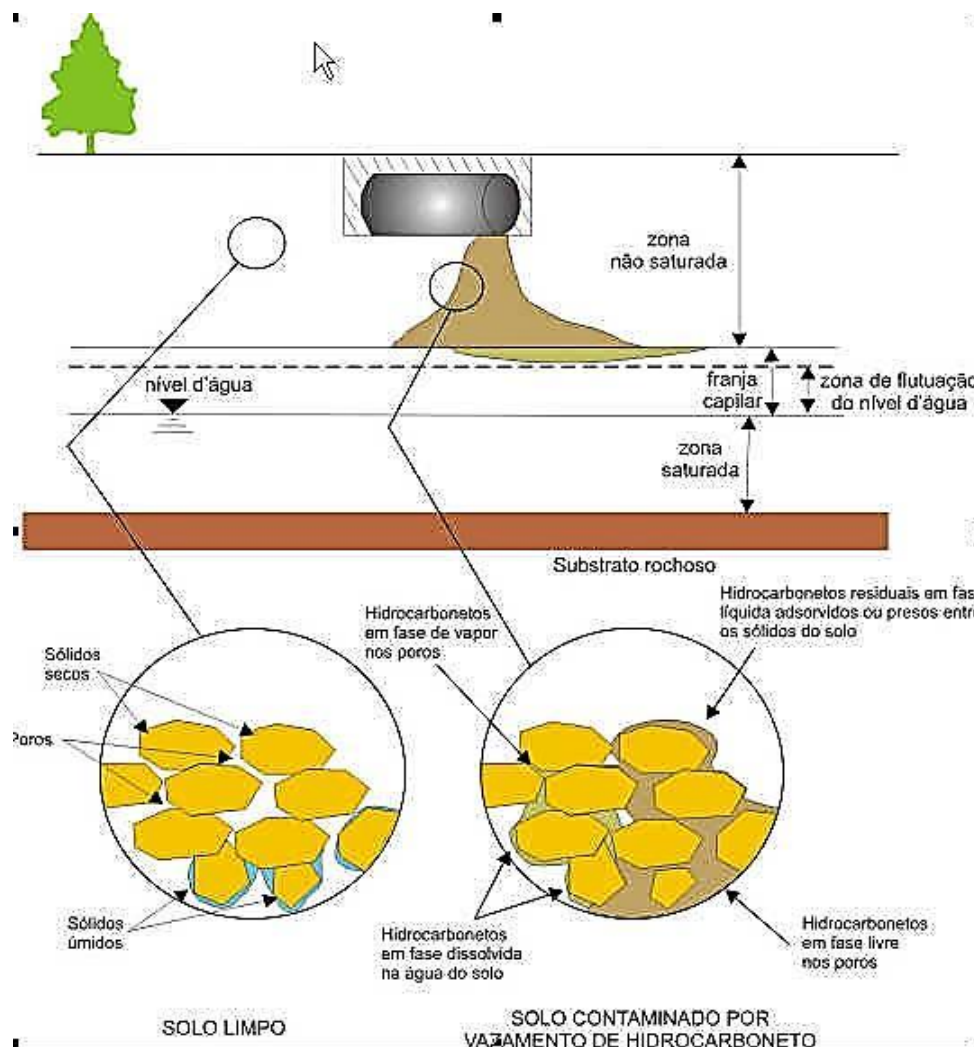
⁵ Lixiviação: é o processo de extração de uma substância presente em componentes sólidos através da sua dissolução num líquido. (Fonte: Wikipédia)

Figura 4 – Diferentes fases presentes nas zonas saturadas e insaturadas



(Fonte: MARIANO 2006, modificado)

Figura 5– Evolução da contaminação por hidrocarbonetos de combustíveis em subsuperfície



(Fonte: USEPA, 2003b, citado por Mariano 2006)

Quando se trata de um grande volume de FLNAL liberado, este se desloca no sentido da franja capilar próximo à zona saturada (Figura 4). Os componentes solúveis do FLNA atravessam e ultrapassam os componentes menos solúveis os citados componentes tendem a se acumular no topo da franja capilar, onde a camada é pouco permeável. Impedindo de mover-se para baixo em função de sua baixa densidade o

FLNAL tende a se espalhar lateralmente sobre o topo da franja capilar, fazendo com que este comece a fluir na mesma direção da água superficial.

3.7 Ensaio e Parâmetros para análise química dos solos

Do ponto de vista da agronomia, a análise química do solo é necessária para pesquisas sobre calagem⁶ de adubação. Uma análise química bem feita permite o agricultor dosar melhor as quantidades de adubo e cal para cada plantio, assim como correções e fertilizantes. Geralmente, a análise de fertilidade e pH do solo é de interesse para a agronomia.

Entretanto, no presente trabalho foram realizadas as citadas análises com o intuito de complementar a análise do possível impacto causado pela contaminação do solo por gasolina comum, pois a agricultura é fonte de grande parte do alimento da humanidade, tornando esta parte da análise também importante.

As Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8, apresentam parâmetros que quantificam e qualificam os teores dos compostos analisados nesta pesquisa. Foram analisados os teores de cálcio e magnésio (Tabela 4), potássio e sódio (Tabela 5), valores de acidez total e alumínio (Tabela 6), quantidade de fósforo (Tabela 7) e de matéria orgânica (Tabela 8). Esses parâmetros foram fornecidos pelo laboratório SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., o mesmo que realizou análise química para a presente pesquisa.

Para a análise do solo contaminado com gasolina comum, a quantidade presente de matéria orgânica é relevante porque esse valor aponta indiretamente a presença dos hidrocarbonetos da gasolina.

⁶ Calagem: etapa do preparo do solo para cultivo agrícola na qual se aplica calcário com os objetivos de elevar os teores de cálcio e magnésio, neutralização do alumínio trivalente (elemento tóxico para as plantas) e corrigir o pH do solo, para um desenvolvimento satisfatório das culturas. (Fonte: Wikipédia. 21/11/2013, às 23h10)

Tabela 4. Parâmetros Quanto aos teores de Cálcio e Magnésio no Solo

Parâmetros Quanto ao Teor de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)			
(Teor de Argila > 350g/kg)			
	Baixo	Médio	Alto
Cálcio (Ca)	< 2,0	2,0 a 5,0	> 5,0
Magnésio (Mg)	< 0,4	0,4 a 1,2	> 1,2

* Valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{meq/100ml}$

Fonte: Laboratório SOLOQUÍMICA- Análise de SOLOS Ltda., adaptada.

Tabela 5 - Parâmetros Quanto aos Teores de Potássio e Sódio no Solo

Parâmetros Quanto ao Teor de Potássio (K) e Sódio (Na)			
	Baixo	Médio	Alto
Potássio (K)	< 0,06	0,06 a 0,13	> 0,13
Sódio (Na)	< 0,15	0,15 a 0,57	> 0,57

* Valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{meq/100ml}$

Fonte: Laboratório SOLOQUÍMICA- Análise de SOLOS Ltda., adaptada.

Tabela 6. Parâmetros Quanto aos Teores de Acidez Total e Alumínio no solo

Parâmetros Quanto aos Teores de Acidez Total(H + Al) e Alumínio (Al)			
	Baixa Toxidez	Média Toxidez	Alta Toxidez
Acidez Total (H +Al)	< 2,5	2,5 a 5,0	> 5,0
Alumínio (Al)	0,0 a 0,3	0,4 a 1,0	> 1,0

* Valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{meq/100ml}$

Fonte: Laboratório SOLOQUÍMICA- Análise de SOLOS Ltda., adaptada.

Tabela 7. Parâmetros Quanto ao Teor de Fósforo no Solo para Sistema Sequeiro

Parâmetros Quanto ao Teor de Fósforo (P) em Sistema Sequeiro

(Teor de Argila de 350 - 600g/kg)

	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito
Fósforo (P)	0 a 3,0	3,1 a 5	5,1 a 8	8,1 a 12	> 12

* Valores em mg/dm³

Fonte: Laboratório SOLOQUÍMICA- Análise de Solos Ltda, adaptada.

Tabela 8. Parâmetros Quanto ao teor de Matéria Orgânica no Solo

Parâmetros Quanto aos Valores de Matéria Orgânica (MO)

(Teor de Argila de 350 - 600 g/kg)

	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Matéria Orgânica	< 24	24 a 30	31 a 45	> 45

* Valores em g/kg

(Fonte: Laboratório SOLOQUÍMICA- Análise de SOLOS Ltda, adaptada)

3.8 Armazenamento em Postos de Gasolina (Tanques)

Segundo a norma NBR 1378-2005 que trata da seleção dos equipamentos para sistemas de instalações subterrâneas de combustíveis, é necessário que os postos de combustíveis realizem controle de estoque regularmente e solicitem o teste de estanqueidade para detecção prévia de vazamentos nos tanques e equipamentos. E ainda cabe ressaltar as diversas normas que devem ser observadas para um apropriado projeto de um posto de combustível. A Tabela 9 apresenta algumas destas normas.

Tabela 9 – Normas Técnicas da ABNT Destinadas à Projetos de Postos de Combustíveis

Norma	Ano	Descrição
NBR 13786	2005	Posto de Serviço - Seleção dos equipamentos para sistemas para instalações subterrâneas de combustíveis
NBR 13312	2003	Posto de Serviço - Construção de tanque atmosférico subterrâneo em aço-carbono
NBR 13783	2005	Posto de Serviço - Instalação do sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis - SASC
NBR 13783	1997	Deteção de vazamento em postos de serviço
NBR 13787	1997	Contro de estoque dos sistemas de armazenamento subterrâneo de combustíveis (SASC) nos postos de serviço
NBR 15005	2003	Posto de Serviço - Válvula antitransbordamento
NBR 15118	2004	Posto de Serviço - Câmaras de contenção construídas em polietileno

MARIANO (2006), citando PEARSON e OUDIIK (1993), aponta as principais causas de vazamentos relacionados aos sistemas de armazenamento subterrâneos de combustíveis (SASC) encontrados nos postos de combustíveis:

- Os tanques são frequentemente instalados sem nenhum cuidado, podendo provocar algum tipo de dano nas paredes;
- Os tanques normalmente não sofrem nenhum tipo de manutenção, permitindo, assim, que a corrosão se instale e comprometa a integridade do material. Tanques que ficam em contato direto com o solo também irão corroer mais rapidamente por causa da umidade e precipitação;
- Quando os tanques ficam vazios ou parcialmente vazios, o lado de dentro do tanque pode corroer rapidamente;

- Os SASC são frequentemente instalados sem a proteção catódica⁷, e detectores de vazamentos;
- Os tanques são normalmente construídos de parede simples, sem revestimento com material anti-corrosivo;
- Quando os tanques são instalados em solos pedregosos e são cobertos com enchimentos reiterados ou com entulhos de construção, permitem rachaduras por pedras, que se expandem dentro de poucos anos;
- Oscilações do nível freático provocam condições mais favoráveis para a corrosão dos tanques e suas conexões quando são instalados na altura ou abaixo do nível freático. Água subterrânea com pH ácido pode acelerar a corrosão do tanque.

⁷ Proteção catódica: método de combate a corrosão, empregado para resguardar estruturas enterradas ou submersas tais como dutos, tanques, pés-de-torre, navios e plataformas. (Fonte: Wikipédia, 21/11/2013, às 23h33)

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Este capítulo detalha os procedimentos de execução e análise em cada etapa da presente pesquisa. Foram realizados os ensaios de: caracterização dos solos por meio da granulometria por peneiramento e por sedimentação, determinação do Gs, limites de consistência sendo limite de liquidez e plasticidade, compactação dos corpos de prova e adensamento das amostras com o solo antes e depois da contaminação por meio do contato com gasolina por variados tempos. Assim como, análise química dos solos por meio dos ensaios de fertilidade e pH em KCL. Os ensaios foram realizados conforme as respectivas Normas Técnicas da ABNT.

É possível visualizar na Tabela 10 a relação entre os ensaios realizados, as respectivas normas específicas de cada ensaio e as normas complementares destes.

Tabela 10 – Normas Técnicas da ABNT para caracterização, compactação e adensamento do solo.

Norma	Ano	Descrição
NBR 6457	1986	Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
NBR 6458	1984	Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm- Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água
NBR 7181	1984	Solo - Análise granulométrica
NBR 6508	1984	Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica
NBR 7180	1984	Solo - Determinação do limite de plasticidade
NBR 6459	1984	Solo- Determinação do limite de liquidez
NBR 7182	1986	Solo - Ensaio de compactação
MB 3336	1990	Solo- Ensaio de adensamento unidimensional

4.1 Coleta do solo

4.2 Ensaio de Caracterização

De acordo com a Norma 6457/86 tomou-se 1,5 kg de solo e peneirou-se na peneira nº 10 cuja malha é de 2 mm. O material que passou na citada peneira foi utilizado para os ensaios de caracterização: Gs (massa específica real), granulometria por sedimentação e LL e LP. Com o que ficou retido na peneira nº 10 fez-se o peneiramento da fração grossa do solo para a confecção da curva granulométrica.

4.2.1 Limites de Atterberg

4.2.1.1 Limites de Liquidez (LL)

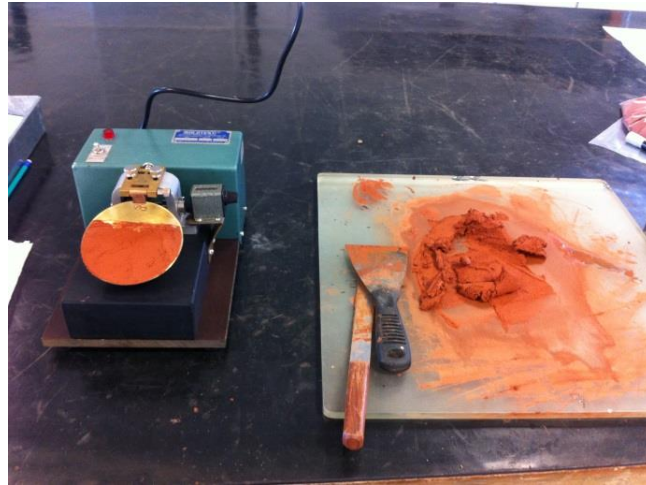
O ensaio de determinação do limite de liquidez é regido pela NBR 6459/84. Toma-se uma amostra com cerca de 200 g do que passou na peneira nº40 (0,42mm).

Para a obtenção do limite de liquidez do solo colocou-se 200g de amostra em uma placa de vidro esmerilhada em uma das faces e acrescentou-se água destilada aos poucos até se ter uma pasta suficientemente úmida e homogenia, até atingir umidade de 25 golpes.

Colocou-se parte dessa mistura na concha do aparelho Casagrande, sem chegar à sua extremidade superior e com cuidado para que não ficassem espaços vazios ou que se formassem bolhas. (Figura 7)

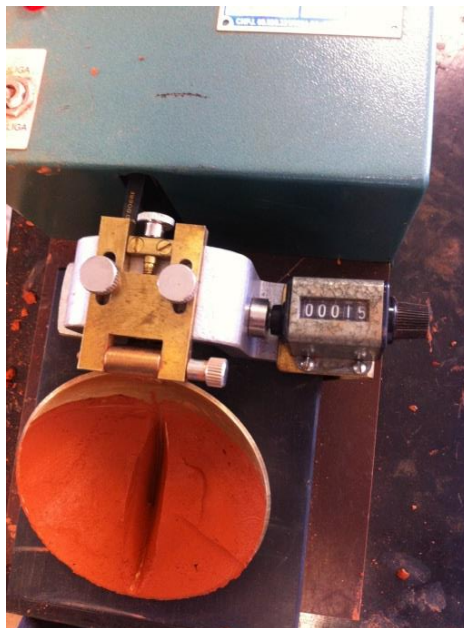
Com o cinzel metálico posicionado embaixo do dedo indicador traçou-se uma ranhura no meio do solo disposto na concha, dividindo-o em dois lados. Conforme observado na Figura 8.

Figura 7 - Ensaio para Determinação do Limite de Liquidez



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 8- Aparelho de Casagrande com Ranhura no Solo



Fonte: Arquivo pessoal

Iniciou-se o golpeamento automático do aparelho de Casagrande elétrico, até que as superfícies de solo separadas pelo cinzel se unissem na parte inferior da concha com uma contagem de 25 golpes, com margem de 2 golpes pra mais e 2 pra menos.

Retirou-se uma fração central desse solo, colocou-se em uma cápsula previamente tarada, pesou-se a massa úmida e levou-se à estufa. Após vinte e quatro horas em processo de secagem, pesou-se a massa seca e calculou-se a umidade (w) conforme a Equação 2 a seguir.

$$w = \frac{(mw - ms) \times 100}{mw} \quad (2)$$

Onde:

w= umidade

mw = massa natural do solo

ms= massa seca em estufa dos sólidos

Todo o processo até então descrito foi repetido cinco vezes, e o limite de liquidez (LL) foi calculado através do gráfico gerado dos valores de umidade (W) encontrados.

4.2.1.2 Limites de Plasticidade (LP)

O ensaio para obtenção do Limite de Plasticidade foi executado conforme a Norma NBR 7180/84, e a preparação das amostras utilizadas nesse ensaio foi feita de acordo com a NBR 6457/86 para Amostras de Solo, Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.

Colocou-se cerca de 200g de material passado na peneira nº40,(0,42mm) em uma placa de vidro com uma face esmerilhada e acrescentou-se gradativamente água destilada. Com o auxílio de uma espátula, homogeneizou-se continuamente a mistura até a obtenção de uma consistência plástica.

Tomou-se a pasta formada e fez-se uma pequena bola com as mãos. Rolou-se a bola cuidadosamente contra a placa de vidro de modo a formar um bastonete com 3mm de espessura e cerca de 100mm de comprimento, semelhante ao cilindro padrão usado como gabarito, e aparecerem fissuras, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Molde de Rolinho no Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Arquivo pessoal

Colocou-se imediatamente o bastonete fragmentado em uma cápsula previamente pesada para determinação de umidade. Pesou-se a cápsula com o solo úmido e levou-se à estufa durante 24h. Após o processo de secagem verificou-se na balança o peso da amostra seca e calculou-se a umidade.

Repetiu-se o processo 5 vezes de modo a obter-se a umidade média através da média aritmética dos valores encontrados, que equivale ao Limite de Plasticidade (LP).

4.2.1.3 Índice de Plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP) dos solos foi determinado através da subtração do valor do Limite de Liquidez pelo Limite de Plasticidade, expresso pela Equação 1:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

LL= Limite de liquidez;

LP= Limite de Plasticidade.

4.2.2 Granulometria

Os ensaios para a caracterização dos grãos do solo são regidos pela NBR 7181/84, Solo – Análise Granulométrica. Para a determinação da granulometria, tomou-se um 1500g de amostra de solo previamente seca, conforme descrito no item 4, e com auxílio de um almofariz foi feito o destorroamento. Passou-se essa quantidade pela peneira n°10 (2 mm) e o que ficou retido nessa peneira foi utilizado no peneiramento grosso.

Lavou-se o solo na peneira n° 10 como o intuito de desagregar os grãos finos que permaneceram aderidos nos maiores. Esse solo lavado foi levado à estufa por vinte e quatro horas. Após o período de secagem passou-se a amostra pelo jogo de peneiras de n° 2", 1 ½", 1", 3/4 3/8, 4 e 10 com o auxílio de um agitador mecânico (Figura 10). Foi feita a pesagem da fração retida em cada peneira acima citada para a elaboração da curva granulométrica.

Da fração que passou da peneira número dez, tomou-se duas amostras de 70g (por ser solo argiloso) para a sedimentação e posterior peneiramento fino de ambas, feitos com e sem agente defloculante.

Figura 10– Peneiramento com Agitador Mecânico (Peneirador Mecânico)



Fonte: Arquivo pessoal

4.2.2.1 Sedimentação

Na preparação da primeira amostra misturou-se 70g que passaram na peneira nº10 e 125 ml de agente defloculante em uma capsula metálica que ficou de repouso durante 24 horas. Este material foi então transferido para o dispersor automático (Figura 11), que foi ativado durante 15 minutos. Com o auxílio de um piceta, transferiu-se o conteúdo do dispersor para uma proveta de 1000ml, preenchendo o volume restante com água destilada, conforme mostrado na Figura 12. Foram feitas leituras com o densímetro e termômetro em diversos intervalos de tempo, durante 24h, para o complemento da curva granulométrica.

O peneiramento fino é realizado após o término da sedimentação. O solo da proveta é transferido para a peneira nº200. Lavou-se com água corrente para desagregar os grãos mais finos e a fração que então ficar retida foi levada à estufa para secagem durante 24h. Após este período, passou-se a amostra pelo jogo de

peneiras de nº 16, 30, 40, 60, 100 e 200 com o auxílio de um peneirador mecânico (Figura 10).

Para a sedimentação da segunda amostra, sem agente defloculante, todo o descrito procedimento foi novamente realizado. Exceto o uso do dispersor automático.

Figura 11– Dispersor Automático



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 12 – Leituras dos Densímetros para Ensaio de Sedimentação com e sem Agente Defloculante



Fonte: Arquivo pessoal

4.2.3 Massa Específica dos Grãos (Gs)

O ensaio para determinação da massa específica dos grãos são regidos pela NBR- 6508/84. O citado ensaio é realizado em três etapas. A primeira consiste na preparação da amostra. Tomou-se 150g (três cápsulas de 50g) de solo previamente passados na peneira de nº 10. O solo, imerso em uma lâmina d'água, ficou em repouso durante 24 h.

Após esse período, colocou-se a mistura das três capsulas em três dispersores automáticos distintos, para ativação simultânea. Os dispersores ficaram ligados durante 15 minutos, marcados com um cronômetro digital. O conteúdo foi então transferido para três picnômetros devidamente calibrados e foram levados à banho-maria também durante 15 minutos. Após o banho-maria foram conectados à bomba à vácuo até que ficassem sem o aparecimento de bolhas (ou 15min).

Na terceira etapa do ensaio, quando os picnômetros estavam à temperatura ambiente, completou-se o volume dos picnômetros com água destilada até que a base do menisco coincidisse com a marca de referência do vidro (Figura 13). Foram então feita a pesagem e aferição da temperatura (Figura 14).

Peso específico dos grãos (γ_s) é encontrada em função do peso e temperatura.

Figura 13 – Volume dos Picnômetros Preenchido com Água Destilada



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 14 – Aferição da Temperatura dos Picnômetros para Determinação do Gs



Fonte: Arquivo pessoal

4.3 Preparação e Contaminação dos Corpos de Prova

4.3.1 Compactação dos Corpos de Prova

Para o ensaio de compactação foi utilizada energia do Proctor Normal. Segundo a Norma NBR 7182/86, para essa energia utilizando cilindros grandes, foi necessário compactar cinco camadas com doze golpes cada. A partir da curva de compactação obteve-se a umidade ótima (maior valor da massa específica aparente seca - γ_d) que foi usada foi valor de referência para todos os cilindros compactados.

Fixou-se o cilindro grande na base metálica e colou-se o anel espaçador de 63,5 milímetros de altura com um disco de papel filtro em sua superfície superior, com o intuito de evitar a aderência do solo como o material metálico. Fixou-se o cilindro auxiliar no topo do cilindro grande.

Colocou-se cinco quilos da amostra de solo previamente seca conforme descrito no item 5.1 em uma bandeja metálica e acrescentou-se uniformemente água destilada e a misturou ao solo, a fim de se obter a umidade ótima.

Com o auxílio de uma pá pequena, despejou-se uma pequena quantidade do solo úmido dentro do cilindro e foram dados doze golpes uniformemente distribuídos na base com o soquete, como mostrado na Figura 15. Este processo é repetido mais quatro vezes sobre a primeira camada compactada.

Após todas as camadas compactadas retirou-se o cilindro auxiliar e com uma espátula fez-se o arrasamento do topo do CP. Parte do material que sobra da camada superior foi imediatamente colocado em três cápsulas para obtenção de umidade.

Retirou-se a base montada embaixo do cilindro, pesou-se o cilindro cheio e envolveu-se o mesmo com camadas de papel filme.

Ao todo, esse processo foi repetido com quinze cilindros que, após devidamente compactados, pesados e isolados, foram alocados em câmara úmida,

para não perderem umidade. No entanto, foram utilizados 06 corpos de prova para os variados tempos apresentados neste capítulo. Inicialmente, tinha-se a intenção de ensaiar 3 CP' s por período porém devido a logística do ensaio de adensamento que demanda em média 5 dias, não foi possível atingir essa meta. Ressalta-se que tais faltas não influenciaram nos resultados obtidos, tendo em vista que ocorreu a contaminação e que fez-se a comparação dos resultados com amostras não contaminadas.

Figura 15 – Compactação do Corpo de Prova



. Fonte: Arquivo pessoal.

4.3.2 Contaminação dos Solos com Gasolina

A ideia inicial para simulação de contaminação com gasolina era de total imersão dos corpos de prova dentro de caixas d'água de 300 litros, com quantidade do fluido suficiente para cobrir os CP's completamente. Porém, por razões de custo de pesquisa e a logística de segurança da instituição de ensino, optou-se pela contaminação do solo por meio de capilaridade e gotejamento.

Colocaram-se os CP's dentro das caixas d'águas sobre uma malha de alumínio, com o intuito de elevar o fundo dos mesmos de forma a permitir melhor contato do fluido com o solo compactado.

Para a contaminação por capilaridade foram utilizados 10 litros de gasolina formando uma lâmina do líquido que cobrisse a base do recipiente. Esse fluido foi constantemente repostado conforme ocorria a evaporação do mesmo.

O gotejamento foi iniciado por meio da utilização de equipos e bolsas de soro hospitalar, substituindo o soro por gasolina comum. As bolsas foram presas às bordas da caixa d'água com ganchos de aço inoxidável e cada equipo foi apoiado nos respectivos corpos de prova, de modo a gotejarem diretamente na parte superior do solo compactado (Figura 16).

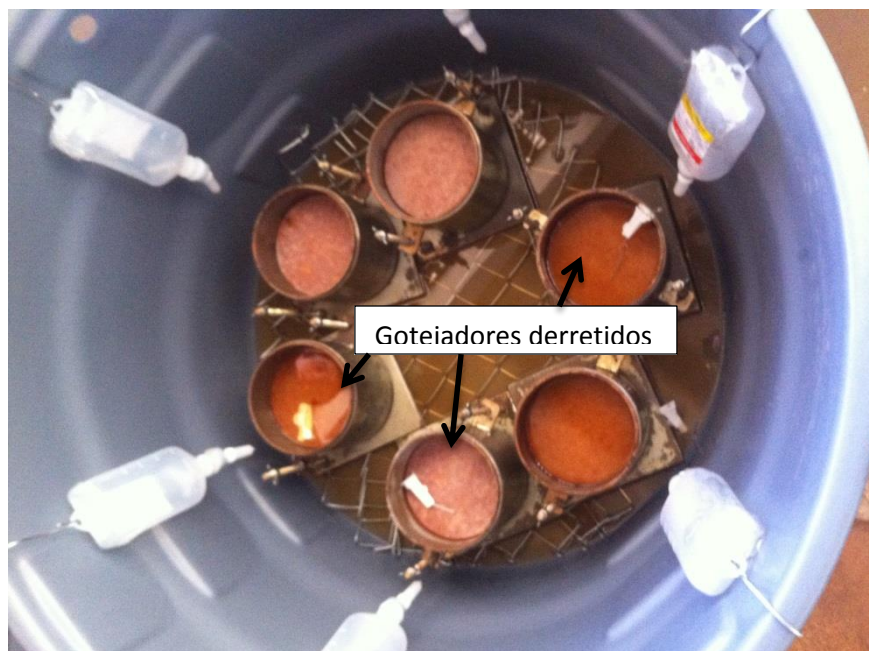
Entretanto, devido a alta agressividade corrosiva do fluido, os equipamentos hospitalares constituídos de material polimérico foram completamente danificados em apenas 24 horas de contato com a gasolina, como pode-se observar na Figura 17. Logo, optou-se pela contaminação somente por meio de capilaridade.

Figura 16- Contaminação por gotejamento.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 17- Equipamento hospitalar danificado pelo fluido agressivo



Fonte: Arquivo pessoal.

As caixas d'água ficaram cobertas com tampa para evitar a evaporação rápida do líquido bastante volátil, e o ambiente no qual estavam os CP's era devidamente ventilado e foi sinalizado visando à segurança do experimento com fluido inflamável. (Figura 18).

Figura 18- Ambiente sinalizado e ventilado



Fonte: Arquivo pessoal.

4.3.2.1 Tempos de Contaminação

Os ensaios de adensamento dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Solos do UniCEUB. O tempo de contaminação das amostras com

gasolina comum foi escolhido baseado na disponibilidade do equipamento para o citado ensaio.

Os CP's ficaram em contato com a gasolina em intervalos de tempo de duas semanas, um, dois, três e quatro meses. Para cada tempo citado foi retirado um corpo de prova para realização do ensaio de adensamento e posteriores avaliações.

No que diz respeito à análise química, realizada pelo laboratório SOLOQUÍMICA - Análise de Solos LTDA. de Brasília ocorreu somente nos períodos de dois e quatro meses de contaminação.

4.4 Adensamento dos Corpos de Prova

O ensaio de adensamento unidimensional do solo foi realizado no Laboratório de Solos do UniCEUB. O citado ensaio foi realizado conforme prescrito pela norma NBR 12007 -MB – 3336 da ABNT.

Iniciou-se o ensaio moldando o corpo de prova de adensamento, que é talhado no próprio anel metálico que será levado à prensa. A amostra foi retirada a partir do CP previamente compactado. O anel é colocado em uma célula entre duas pedras porosas. Depois de devidamente montada, a célula foi levada ao edômetro para a aplicação de carga, que foi feita por etapas.

Aplicou-se a carga de contato de 10kPa e o extensômetro, conectado ao computador, fez as leituras de 15 e 30s, 1, 2, 4, 8, 15 e 30 minutos, até que houvesse estabilização da altura do corpo de prova. Então se aumentou novamente a carga a cada 24 horas, sendo estas de 50, 100, 200 e 400 kPa. Para cada carga aplicada, registrou-se a deformação em diversos intervalos de tempo, até a estabilização.

Após a aplicação da ultima carga de 400 kPa, iniciou-se o descarregamento gradual, após a estabilização (30 minutos).

Ao término do ensaio, segundo a norma mencionada, deve-se determinar a umidade do solo. Porém, como na presente pesquisa foi utilizada gasolina comum, um fluido altamente inflamável, não foi determinada a umidade pelo risco iminente de um fluido com tal característica ser colocado em uma estufa de 105°C.

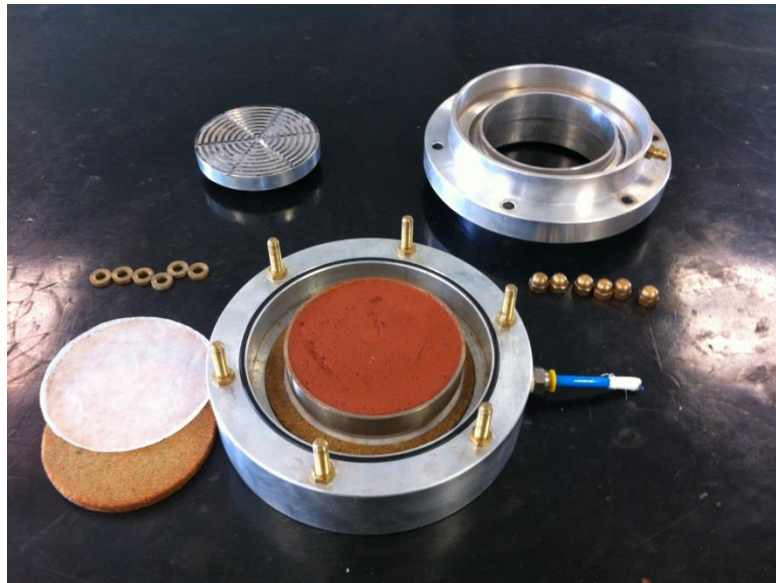
A Figura 19 corresponde à moldagem do CP e a Figura 20 corresponde ao CP dentro do anel moldado para o ensaio de adensamento. A Figura 21 corresponde ao equipamento edômetro durante a execução do citado ensaio.

Figura 19- Molde do solo no anel de adensamento



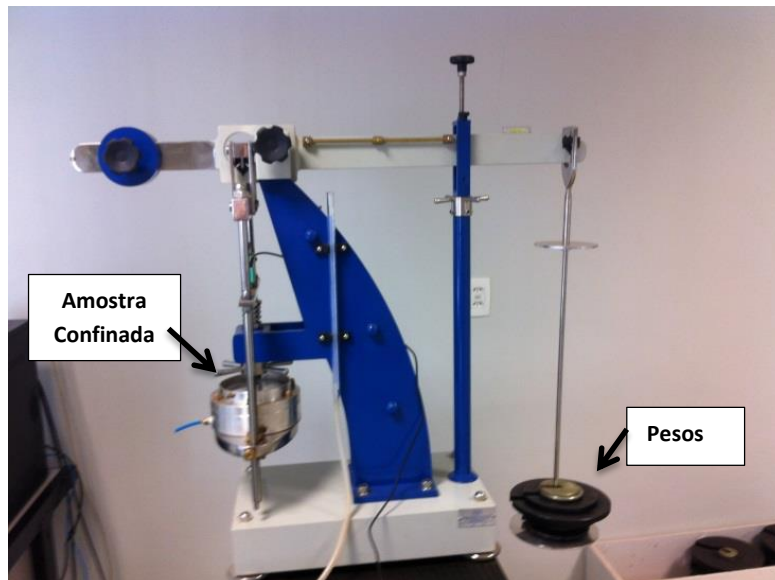
Fonte: Arquivo pessoal

Figura 20 - Célula de Adensamento Desmontada



Fonte: Arquivo pessoal

Figura 21– Equipamento de Adensamento com Célula e Carga Adicionada



Fonte: Arquivo pessoal

4.5 Análise Química

Os parâmetros de análise química averiguados no presente trabalho foram baseados na dissertação de mestrado de FARIAS (2003). Porém, como a citada análise foi realizada pelo laboratório SOLOQUÍMICA Análise de Solos LTDA., devido a limitação de tecnologia e custo elevado, foram realizados somente os ensaios para a verificação do pH e da fertilidade do solo, que são importantes para verificação de alterações nos solos.

Foram feitas análises químicas em amostras de solo virgem e de solo exposto à contaminação com gasolina comum durante os períodos de dois e quatro meses. As citadas amostras foram retiradas dos corpos de prova previamente compactados ao moldar o anel para cada ensaio de adensamento.

Coletaram-se amostras da base e do topo de cada CP, para verificar se havia diferença dos parâmetros analisados. Colocou-se cerca de 200g de cada amostra em sacos plásticos para a realização do transporte até o laboratório SOLOQUÍMICA, situado em Brasília.

Os procedimentos de análise no citado laboratório foram realizados conforme manual de Análises Químicas Para Avaliação da Fertilidade do Solo elaborado pela EMBRAPA Solos.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Índices de Consistência do Solo

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a determinação do índice de plasticidade (IP) se dá através da subtração do valor do limite de plasticidade (LP) pelo limite de liquidez (LL).

Os valores de LP e LL obtidos da análise do solo foram de 63,35% e 37,43%, respectivamente. Portanto, o valor calculado para o IP corresponde à 25,9%.

De acordo com a Tabela 1, apresentada na revisão bibliográfica, que classifica o solo baseado no valor do IP, o solo analisado corresponde à um solo altamente plástico.

As planilhas de cálculo utilizadas para a determinação dos mencionados valores encontram-se no Anexo I.

5.2 Massa Específica dos Grãos

Conforme se observa na Tabela 11, o valor da massa específica dos grãos (G_s) do solo analisado nesta pesquisa foi de 2,82 g/cm³. O resultado obtido encontra-se dentro dos parâmetros aceitáveis. Baseado nos parâmetros citados na revisão bibliográfica deste trabalho, este solo analisado classifica-se como solo inorgânico.

Tabela 11 – Resultados para a determinação do G_s

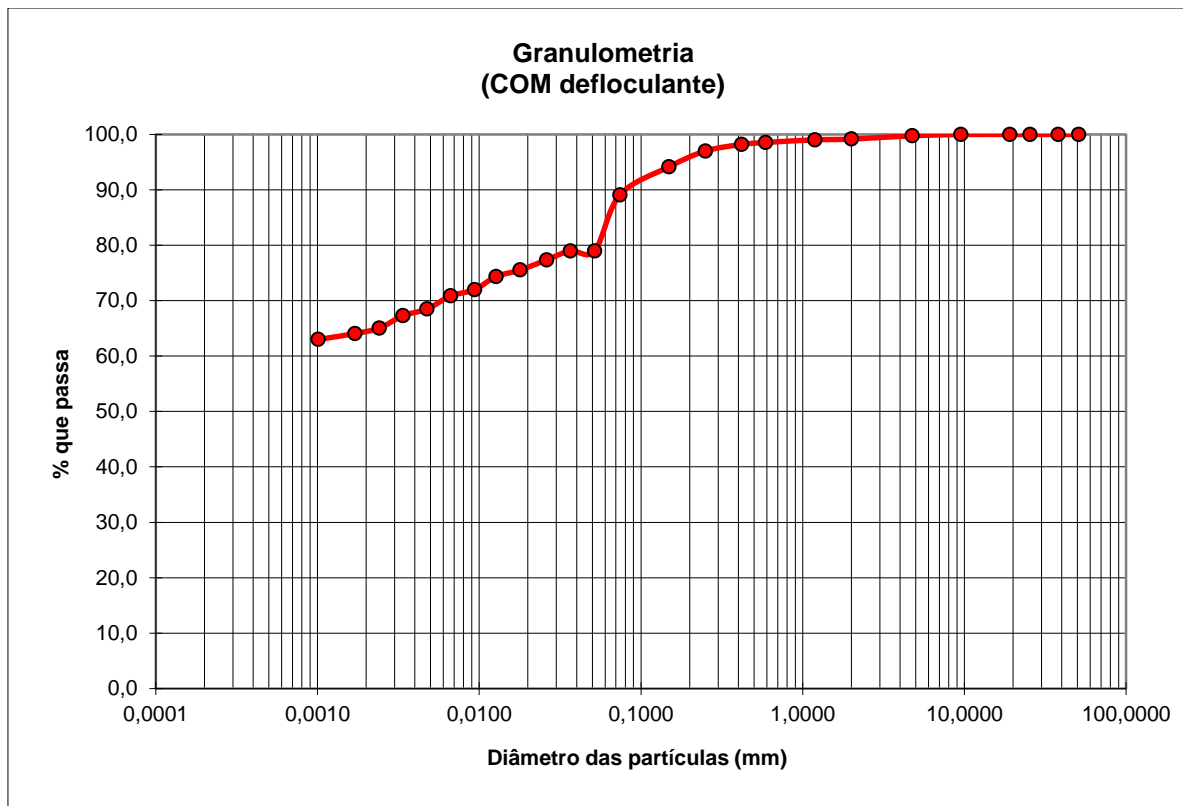
Massa específica dos grãos # 2mm			
Ensaio com picnômetro:	A	B	C
Picnômetro N°	11	12	8
Temperatura (°C)	26,6	26,6	26,6
Pic. + água (g)	703,56	634,60	656,54
Pic. + água + solo(g)	734,41	665,36	687,30
G (g/cm ³)	2,83	2,81	2,81
G_s :			2,82

A Tabela 12 apresenta as porcentagens da composição granulométrica do solo laterítico analisado na presente pesquisa. Pode-se observar que a maior fração deste solo é de argila, que corresponde à 64,5% do total. A Figura 22 representa a curva granulométrica do solo com agente defloculante, obtida através dos ensaios de peneiramento e sedimentação. A curva granulométrica para o solo sem agente defloculante encontra-se em Anexo II.

Tabela 12 – Granulometria : percentual de composição do solo

d (mm)	% mat. passa	% mat.ret.	MATERIAL*	% do material
50,80	100,0	0,0	20,0< Pedregulho grosso <60,0	0,0
38,10	100,0	0,0		
25,40	100,0	0,0		
19,10	100,0	0,0	6,0< Pedregulho médio <20,0	0,2
9,52	100,0	0,0		
4,76	99,8	0,2	2,0< Pedregulho fino <6,0	0,7
2,00	99,2	0,8		
1,190	99,0	1,0	0,6< Areia grossa <2,0	0,6
0,590	98,6	1,4	0,2< Areia média <0,6	3,0
0,420	98,2	1,8		
0,250	97,0	3,0		
0,149	94,2	5,8	0,06< Areia fina <0,2	16,6
0,074	89,1	10,9		
0,0518	79,0	21,0		
0,0366	79,0	21,0	0,002 < Silte < 0,06	14,5
0,0261	77,4	22,6		
0,0179	75,5	24,5		
0,0127	74,4	25,6		
0,0094	72,0	28,0		
0,0066	70,8	29,2		
0,0047	68,5	31,5		
0,0034	67,3	32,7		
0,0024	65,0	35,0		
0,0017	64,1	35,9		
0,0010	63,0	37,0	Argila < 0,002	64,5
* ABNT - NBR 6502, Rochas e Solos - setembro 1995 (unidade em mm)				100,0

Figura 22 – Curva Granulométrica



5.3 Ensaios de Adensamento do Solo

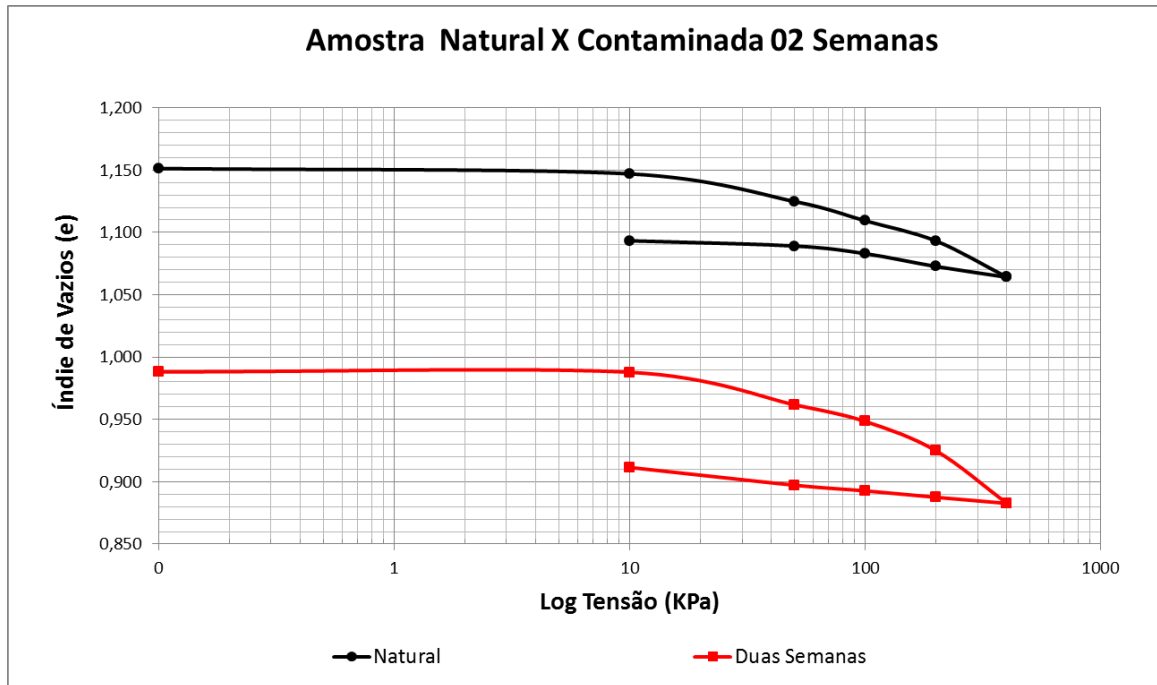
Conforme apresentado na revisão bibliográfica, os resultados obtidos no ensaio de adensamento do solo são expressos em um gráfico, conhecido como Curva de Compressibilidade. As variáveis da citada curva são relativas ao índice de vazios (e) em função da carga aplicada (kPa), em escala logarítmica. No presente trabalho foram comparadas as curvas de compressibilidade da amostra natural com as amostras contaminadas pelos variados períodos de tempo pré-determinados.

Na Figura 23 observa-se que quando comparado o índice de vazios inicial da amostra natural com a contaminada durante 02 semanas, há uma variação de 16%. Para a amostra natural, após a aplicação da máxima carga (400 kPa), o índice de vazios reduziu 7,5% , e após o descarregamento a variação total final foi de 5,8%.

No que diz respeito à amostra contaminada pelo período de 02 semanas, o valor do índice de vazios inicial foi de 0,988, após a ultima carga, ficou 0,883 (redução de 10%). E a variação do valor de e inicial para a final, após o descarregamento foi de 0,988 para 0,911. (7,8%).

Percebe-se por meio da análise dos resultados que o índice de vazios inicial da amostra depois da contaminação, comparando com o resultado deste índice da amostra natural, diminuiu em 16%. Essa redução ocorre por causa da saturação do fluido ocupando os vazios do solo, conforme descrito por FARIAS (2003), na revisão bibliográfica deste trabalho no item 3.6.1.4,.

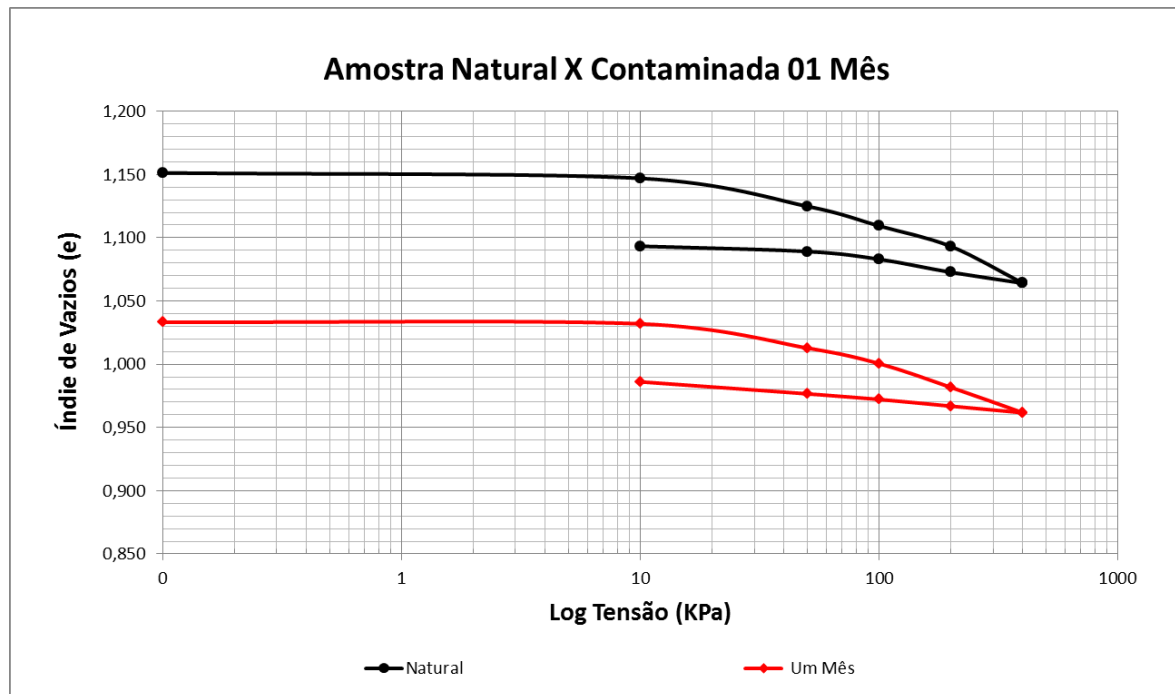
Figura 23- Curva de Compressibilidade Comparativa Entre Amostra Natural e Contaminada por 02 Semanas.



De acordo com a Figura 24, quando aplicada a carga máxima de 400 kPa na amostra de solo contaminado por 01 mês, a redução do índice de vazios foi de aproximadamente 7%. A variação total para o citado parâmetro observada ao término dos ensaios de adensamento foi de 4,5 %.

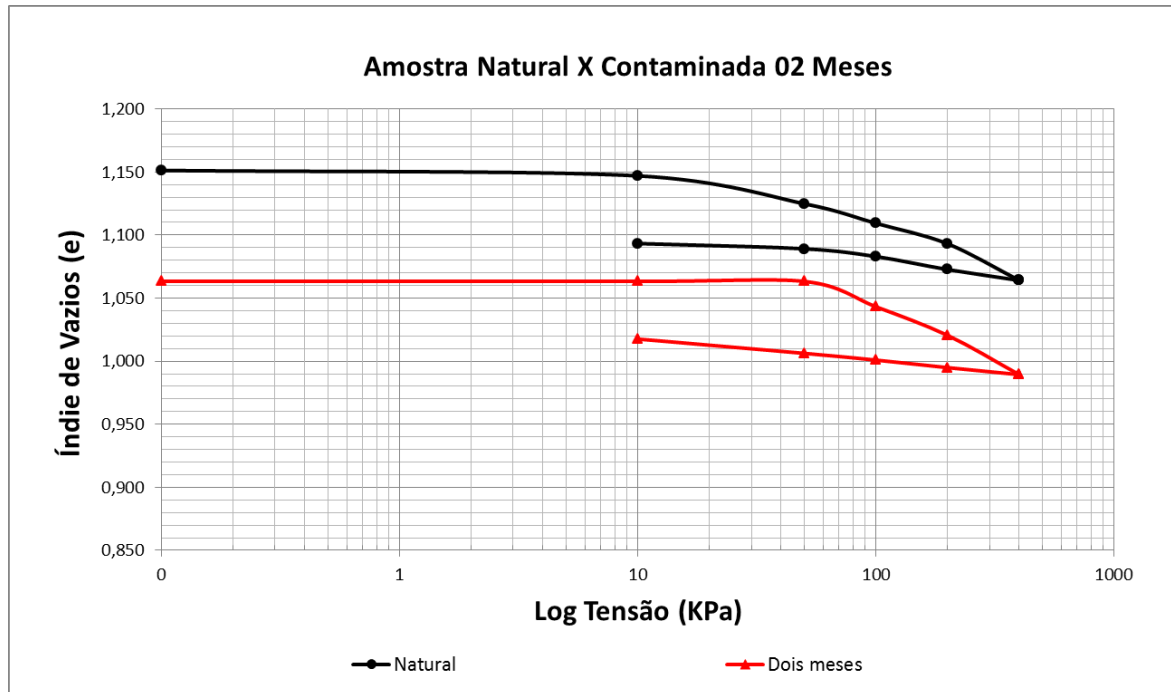
Quando comparado o índice de vazios inicial de ambas amostras representadas na Figura 24, percebe-se uma diferença de pouco mais de 10%. No entanto com relação aos resultados apresentados para a amostra contaminada pelo tempo de 2 semanas ocorreu o aumento do índice de vazios inicial, em 4,3%. Esse resultado indica a possível evaporação do fluido contaminante, que apresenta características bastante voláteis, observação levantada também por FARIAS (2003) e constatada neste estudo.

Figura 24 - Curva de Compressibilidade Comparativa Entre Amostra Natural e Contaminada por 01 Mês



A variação do valor do índice de vazios inicial entre as amostra natural e contaminada pelo período de 02 meses é de 7,6%. Também se observou diferença na variação total durante o carregamento e descarregamento entre ambas amostras representadas na Figura 25. A variação total deste valor ao termino do ensaio para a amostra natural corresponde à 5%. Quanto à amostra contaminada, de 6,9%.

Figura 25- Curva de Compressibilidade Comparativa Entre Amostra Natural e Contaminada por 02 Meses

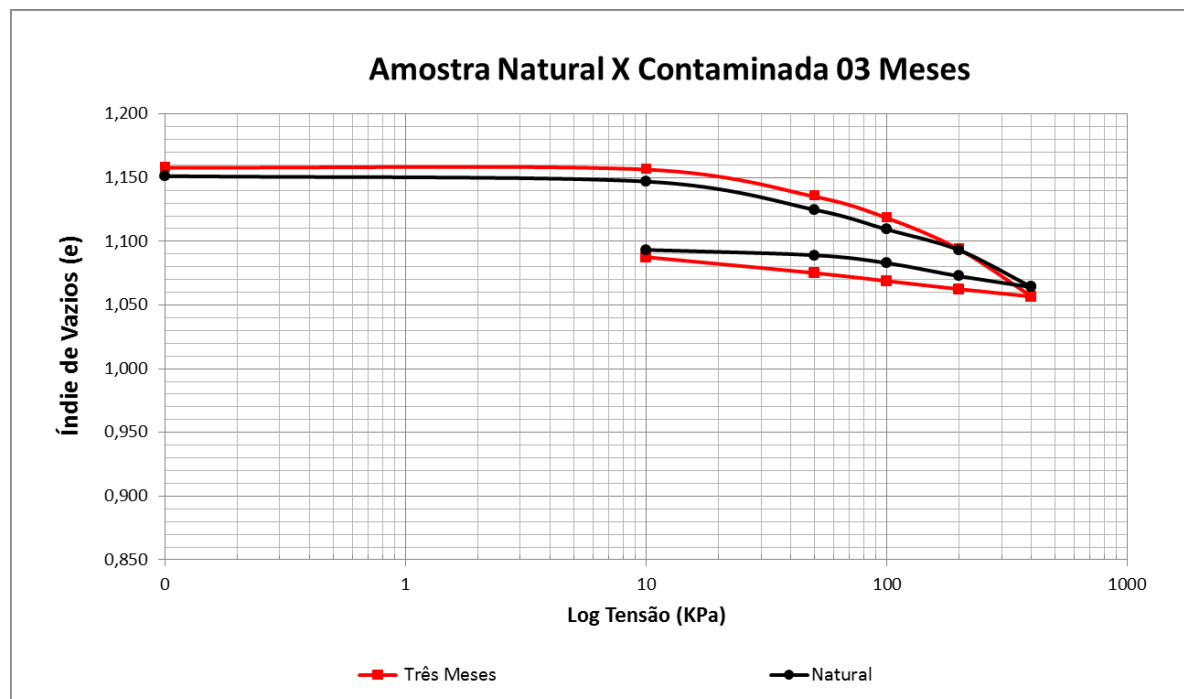


Ao realizar a comparação entre a amostra natural e a contaminada por 03 meses observa-se que o valor do índice de vazios inicial de ambas as amostras tende a se assemelhar com o decorrer do tempo, tendo em vista os resultados anteriores para os períodos de 02 semanas, 01 e 02 meses. Para o período de 03 meses de contaminação o valor de e ultrapassa levemente o valor da amostra natural, tendo uma elevação de menos de 1%. No que diz respeito à variação total do índice de vazios, também foi semelhante, sendo de 5% para a amostra natural, e de 6% para a contaminada. (Figura 26)

O índice da amostra contaminada pelo período de 03 meses seguiu a mesma tendência de aumento observado para os menores tempos de contaminação conforme discutido em itens anteriores, exceto para o de 02 semanas, que diminuiu. Logo, percebe-se que devido a contaminação do solo ocorre uma redução inicial no

índice de vazios para o menor tempo (02 semanas) e, posteriormente, esse índice aumenta, mostrando que ocorreu uma saturação inicial contaminando o solo e, posteriormente, devido ao fluido ser bastante volátil, ocorre o aumento do índice de vazios. No entanto, cabe lembrar que já aconteceu a saturação total, ou seja, a contaminação, que inclusive é constatada nas variações de carbono da amostra, apontadas no item da análise química que trata dos teores de matéria orgânica.

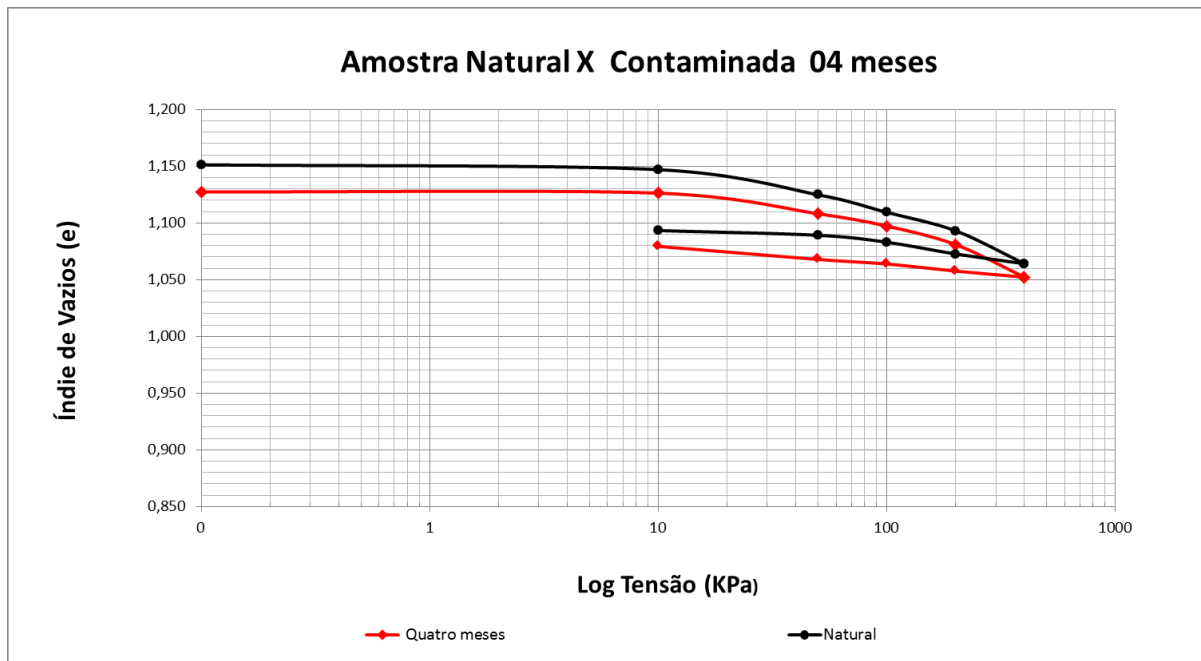
Figura 26 - Curva de Compressibilidade Comparativa Entre Amostra Natural e Contaminada por 03 Meses



Conforme mostrado na Figura 27, a variação total do índice de vazios para o ensaio realizado com a amostra contaminada pelo período de 04 meses foi de aproximadamente 7% (e inicial: 1,127. e ao término do descarregamento: 1,079). Como citado previamente, a mesma variação relativa à amostra natural corresponde à amostra 5%. Quando comparados os índices de vazios iniciais de ambas amostras,

percebe-se diferença de apenas 2%. Percebe-se pelos resultados que as variações de índice de vazios ocorreram de maneira diferente devido à presença da gasolina.

Figura 27 - Curva de Compressibilidade Comparativa Entre Amostra Natural e Contaminada por 04 Meses



Resumindo, a variação do percentual do índice de vazios inicial entre a amostra natural e as amostras contaminadas para os tempos de 02 semanas, 01, 02, 03 e 04 meses, foi de 14, 10, 7,6, 1 e 2%, respectivamente. Ou seja, no menor tempo em que o CP ficou em contato com a gasolina (02 semanas), ocorreu a maior redução do índice de vazios no solo. E com o decorrer do tempo, os outros CP's analisados, correspondentes à períodos mais longo de contaminação, apresentaram uma tendência de aumento do índice de vazios, resultados esperado para uma amostra contaminada com um fluido volátil.

5.4 Análise Química do Solo

Os parâmetros dos valores de cálcio, magnésio, fósforo e matéria orgânica no solo analisado dependem da quantidade de argila em g/kg. As Tabelas 13,14 e15, fornecidas pelo Laboratório SOLOQUÍMICA, responsável pelos resultados da análise química desta pesquisa, apresentam os parâmetros para os citados compostos de acordo com a quantidade de argila.

Tabela 13 – Parâmetros do teor de fósforo de acordo com a quantidade de argila no solo

SISTEMA SEQUEIRO					
Quanto ao teor de Fósforo (P), em mg/dm³					
<i>Critério Utilizado para</i>	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
<i>Argila < 150 g/kg</i>	0 a 6,0	6,1 a 12	12,1 a 18	18,1 a 25	> 25
<i>Argila = 150 - 350 g/kg</i>	0 a 5,0	5,1 a 10	10,1 a 15	15,1 a 20	> 20
<i>Argila = 350-600 g/kg</i>	0 a 3,0	3,1 a 5	5,1 a 8	8,1 a 12	> 12
<i>Argila > 600 g/kg</i>	0 a 2,0	2,1 a 3	3,1 a 4	4,1 a 6	> 6

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solo Ltda.

Tabela 14 – Parâmetros dos teores de cálcio e magnésio de acordo com a quantidade de argila no solo

Quanto aos teores de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg).						
Teor de Argila	Teor de Ca, extraído com KCl 1N			Teor de Mg, extraído com KCl 1N		
	cmolc/dm³ = meq/100ml			cmolc/dm³ = meq/100ml		
Critérios para	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
< 150 g/kg	< 0,5	0,5 a 1,2	> 1,2	< 0,1	0,1 a 0,3	> 0,3
150-350 g/kg	< 1,0	1,0 a 2,5	> 2,5	< 0,2	0,2 a 0,6	> 0,6
> 350 g/kg	< 2,0	2,0 a 5,0	> 5,0	< 0,4	0,4 a 1,2	> 1,2

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solo Ltda.

Tabela 15 – Parâmetros do teor de matéria orgânica de acordo com a quantidade de argila no solo

Quanto aos valores da Matéria Orgânica - g/kg				
<i>Critério Utilizado para</i>	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Argila < 150 g/kg	< 8	8 a 10	11 a 15	> 15
Argila = 150-350 g/kg	< 15	15 a 30	30 a 40	> 40
Argila = 350-600 g/kg	< 24	24 a 30	31 a 45	> 45
Argila > 600 g/kg	< 28	28 a 35	36 a 52	> 52

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solo Ltda.

A quantidade de argila no solo é determinada através da análise da textura do mesmo e de sua composição granulométrica, que determina a quantidade de cada tipo de grão da amostra. Com a finalidade de obter-se uma análise química mais precisa, o laboratório SOLOQUÍMICA também determinou a textura do solo, cujo resultado é apresentado na Tabela 16. Observa-se, portanto, que a quantidade de argila na amostra de solo analisada é de 550 g/kg.

Tabela 16– Composição Granulométrica do Solo Natural Segundo Análise Química

Composição Granulométrica (Textura do Solo)	
Argila	550
Areia	175
Silte	275

* Valores em g/kg

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solo Ltda.

5.4.1 Análise Química do Solo Contaminado Durante 02 Meses

De acordo com a Tabela 17, observa-se que a quantidade de fósforo presente na amostra natural (antes da contaminação com a gasolina comum) e contaminada com gasolina no período de 02 meses teve diminuição de 34% aproximadamente, para as amostras retiradas da base do corpo de prova, enquanto permaneceu inalterada nas amostras do topo do CP. Ressalta-se que o topo das amostras foram saturadas com gasolina comum também a cada tempo. De acordo com os parâmetros

para o teor de fósforo para a quantidade de argila apresentados na revisão bibliográfica do presente trabalho, os valores do teor de fósforo de todas as amostras classifica-se como muito baixo, variando entre 0 a 3,0 mg/dm³ (Tabela 13).

Tabela 17 – Comparativo da quantidade de Fósforo presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Quantidade de Fósforo (P) em Amostras Natural, Contaminada e Parâmetros						
	Natural	Contaminada	Parâmetros			
	Quantidade	Quantidade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto
Base	0,5	0,3	0 a 3,0	3,1 a 5	5,1 a 8	8,1 a 12
Topo	0,4	0,4				
						> 12

* valores em mg/dm³ = ppm

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solo Ltda. , adaptada pela autora.

No que diz respeito aos teores de cálcio observou-se que redução da quantidade de aproximadamente 34% quando comparado com os valores tanto da amostra do topo, quanto da base. De acordo com os parâmetros apresentados, a amostra possui baixo teor de cálcio (Tabela 18). Sendo assim, o teor de cálcio encontrado classificado como baixo na pesquisa corresponde a um fator negativo, pois o ideal segundo SENGIT (2003), este valor deveria ser médio para o apropriado cultivo com este solo.

Os valores de magnésio também apresentaram redução de 34 % na base do CP quando o solo foi contaminado com gasolina comum. Porém, permaneceu inalterado na amostra coletada no topo do CP. Ambas amostras, de solo natural e contaminado, enquadram-se com baixo teor de magnésio. Um baixo teor de magnésio no solo e, conseqüentemente, nas plantas, altera o desenvolvimento da vegetação, que apresentam-se menores que os oriundos de solo com teor mais elevado deste composto. Esta deficiência pode ser corrigida com aplicação de calcário, sulfato de magnésio ou sulfato de potássio e magnésio.

Cabe ressaltar que os citados parâmetros dependem do teor de argila presente no solo, que no caso das amostras analisadas, possuem 550 g/kg de argila na composição (Tabela 16)

Tabela 18 – Comparativo da quantidade de Cálcio e Magnésio presente nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Quantidade de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) em Amostras Natural, Contaminada e Parâmetros						
		Natural	Contaminada	Parâmetros		
		Quantidade	Quantidade	Baixo	Médio	Alto
Cálcio (Ca)	Base	0,6	0,4	< 2,0	2, 0 a 5,0	> 5,0
	Topo	0,5	0,3			
Magnésio (Mg)	Base	0,3	0,2	< 0,4	0,4 a 1,2	> 1,2
	Topo	0,2	0,2			

* valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{mE}/100\text{mL}$

** Parâmetros utilizados para teor de argila > 350 g/kg

Os teores de potássio e sódio apresentados nas amostras natural e contaminada se apresentaram como baixos. Salvo a quantidade de potássio encontrada na amostra contaminada na base do corpo de prova, que aumentou de 0,03 para 0,07 mE/100ml quando em contato com o fluido contaminante durante dois meses, passando então a ser considerada com médio teor de potássio na amostra. (Tabela 19)

Como todos os resultados apresentados para os teores de potássio classificam-se como baixos ou médio, de acordo com os parâmetros ideais deste componente, o solo analisado deveria receber adubação de correção para a agricultura. Esta solução também se aplica para o resultado encontrado para o teor de fósforo do solo, que enquadra-se como muito baixo. (Tabelas 17 e 22).

Tabela 19 – Comparativo da quantidade de Potássio e Sódio presentes nas amostras virgem e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Quantidade de Potássio (K) e Sódio (Na) em Amostra Natural e Contaminada X Parâmetros						
		Natural	Contaminada	Parâmetros		
		Quantidade	Quantidade	Baixo	Médio	Alto
Potássio (K)	Base	0,03	0,07	< 0,06	0,06 a 0,13	> 0,13
	Topo	0,06	0,03			
Sódio (Na)	Base	0,01	0,02	< 0,15	0,15 a 0,57	> 0,57
	Topo	0,02	0,02			

* valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{mE}/100\text{mL}$

Quando analisado o teor de acidez total do solo nas amostras natural e contaminado durante dois meses, os valores permaneceram praticamente inalterados, ocorrendo apenas uma pequena redução de 5% na quantidade presente na base do CP. Quanto ao teor de acidez total, o solo em análise possui baixa toxidez, conforme apresentado na Tabela 20 abaixo.

A amostra de solo analisada está livre do composto alumínio, apresentando valores iguais a zero na composição em todas as amostras analisadas. Deste modo, quando ao teor de alumínio, possui baixa toxidez.

Tabela 20 – Comparativo da acidez total e alumínio presentes nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Teores de Acidez Total (H + Al) e Alumínio (Al) em Amostra Natural e Contaminada X Parâmetros						
		Natural	Contaminada	Parâmetros		
		Quantidade	Quantidade	Baixa Toxidez	Média Toxidez	Alta Toxidez
Acidez Total (H + Al)	Base	2	1,9	< 2,5	2,5 a 5,0	> 5,0
	Topo	1,9	1,9			
Alumínio (Al)	Base	0	0	0,0 a 0,3	0,4 a 1,0	> 1,0
	Topo	0	0			

* valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{mE}/100\text{mL}$

Dentre todos os teores apresentados na análise química do presente trabalho, o que apresentou maior variação quando comparadas as amostras natural e contaminada, foi a quantidade de matéria orgânica presente. Quando comparados os valores das amostras natural e contaminada na base do corpo de prova, houve aumento de 650% da quantidade de MO presente após a contaminação com a gasolina comum. Já nas amostras do topo do corpo de prova, a variação foi um pouco menor, porém ainda discrepante, de 583% mais quantidade de MO no corpo de prova. (Tabela 21)

Os parâmetros apresentados foram baseados no teor de argila entre 350 e 600g/kg, pois, de acordo com a Tabela 16, a amostra de solo possui 550 g/kg de argila.

Tabela 21 – Comparativo da quantidade de matéria orgânica presentes nas amostras natural e contaminada durante 02 meses com os parâmetros pré- estabelecidos

Quantidade de Matéria Orgânica em Amostras Natural e Contaminada X Parâmetros						
Natural		Contaminada		Parâmetros		
Quantidade		Quantidade	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Base	2,2	14,3	< 24	24 a 30	31 a 45	> 45
Topo	3,4	19,8				

* valores em g/ kg

** Parâmetros utilizados para teor de argila variando entre 350 e 600 g/kg

5.4.2 Análise Química do Solo Contaminado Durante 04 Meses

De modo geral, não ocorreram grandes alterações nos teores verificados na análise química de 04 meses de contaminação com relação à primeira, relativa aos 02 meses do processo. As Tabelas 22, 23, 24, 25 e 26 seguem o mesmo padrão comparativo apresentados nos resultados da análise de dois meses. Nas mencionadas Tabelas averigua-se os teores dos compostos presentes no solo contaminado durante 04 meses, comparados com os apresentados na amostra

natural analisada. Apresentam, ainda, os parâmetros para enquadramento destes valores.

Tabela 22 – Comparativo da quantidade de Fósforo presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos

Quantidade de Fósforo (P) em Amostras Natural, Contaminada e Parâmetros							
	Natural	Contaminada	Parâmetros				
	Quantidade	Quantidade	Muito Baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Base	0,5	0,3	0 a 3,0	3,1 a 5	5,1 a 8	8,1 a 12	> 12
Topo	0,4	0,9					

* valores em mg/dm³ = ppm

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., adaptado pela autora

Tabela 23 – Comparativo da quantidade de Cálcio e Magnésio presente nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Quantidade de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) em Amostras Natural, Contaminada e Parâmetros						
Natural			Contaminada	Parâmetros		
Quantidade			Quantidade	Baixo	Médio	Alto
Cálcio (Ca)	Base	0,6	0,9	< 2,0	2, 0 a 5,0	> 5,0
	Topo	0,5	3,1			
Magnésio (Mg)	Base	0,3	0,3	< 0,4	0,4 a 1,2	> 1,2
	Topo	0,2	0,8			

* valores em cmolc/dm³ = mE/100mL

** Parâmetros utilizados para teor de argila > 350 g/kg

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., adaptado pela autora

Tabela 24 – Comparativo da quantidade de Potássio e Sódio presentes nas amostras virgem e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Quantidade de Potássio (K) e Sódio (Na) em Amostra Natural e Contaminada X Parâmetros						
Natural			Contaminada	Parâmetros		
Quantidade			Quantidade	Baixo	Médio	Alto
Potássio (K)	Base	0,03	0,03	< 0,06	0,06 a 0,13	> 0,13
	Topo	0,06	0,02			
Sódio (Na)	Base	0,01	0,02	< 0,15	0,15 a 0,57	> 0,57
	Topo	0,02	0,01			

* valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{mE}/100\text{mL}$

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., adaptado pela autora

Tabela 25 – Comparativo da acidez total e alumínio presentes nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos.

Teores de Acidez Total (H + Al) e Alumínio (Al) em Amostra Natural e Contaminada X Parâmetros						
Natural		Contaminada	Parâmetros			
Quantidade		Quantidade	Baixa Toxidez	Média Toxidez	Alta Toxidez	
Acidez Total (H + Al)	Base	2	< 2,5	2,5 a 5,0	> 5,0	
	Topo	1,9				
Alumínio (Al)	Base	0	0,0 a 0,3	0,4 a 1,0	> 1,0	
	Topo	0				

* valores em $\text{cmolc/dm}^3 = \text{mE}/100\text{mL}$

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., adaptado pela autora

Tabela 26 – Comparativo da quantidade de matéria orgânica presentes nas amostras natural e contaminada durante 04 meses com os parâmetros pré- estabelecidos

Quantidade de Matéria Orgânica em Amostras Natural e Contaminada X Parâmetros						
Natural	Contaminada	Parâmetros				
Quantidade	Quantidade	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	
Base	2,2	< 24	24 a 30	31 a 45	> 45	
Topo	3,4					

* valores em g/ kg

** Parâmetros utilizados para teor de argila variando entre 350 e 600 g/kg

Fonte: SOLOQUÍMICA – Análise de Solos Ltda., adaptado pela autora

Apesar da leve ou nenhuma variação apresentada nos resultados, percebe-se novamente que o teor de matéria orgânica presente no solo é o destoante dos demais valores.

A Tabela 26 mostra que a amostra coletada na base do CP apresentou aumento da quantidade de MO em 78% com relação à amostra natural. Porém, reduziu 32% com relação à quantidade obtida na análise de 02 meses (Tabela 21). No que diz respeito aos valores respectivos ao topo do CP, a variação com relação a amostra natural foi ainda maior, de quase 89%, e 35% com relação à análise realizada em metade do tempo de contaminação.

Ressalta-se que o citado resultado é muito importante quanto à capacidade de suporte dos solos, tendo em vista que quanto maior a quantidade de matéria orgânica no solo maior é a tendência à redução dessa capacidade. Cabe lembrar que os tanques dos postos de gasolina são alocados em escavações no solo e necessitam de uma superfície resistente e de baixa deformabilidade, pois se ocorrerem movimentações nessas superfícies os tanques também poderão sofrer algum tipo de deformação, tendendo a fissura ou ruptura das paredes do tanque, consequentemente aumentando a quantidade de fluido em contato com o solo.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como demonstrado na apresentação e análise de resultados dos ensaios de adensamento do solo, a alteração mais significativa do valor do índice de vazios ocorreu no ensaio realizado após duas semanas de exposição do corpo de prova com gasolina comum. Com base nos resultados de adensamento em todos os intervalos de tempo, é confirmado que ocorre redução brusca do índice de vazios nos primeiros dias de contaminação, devido à saturação do solo com o fluido.

Observou-se nos resultados da análise química que ocorreram mudanças bastante significativas nos teores de matéria orgânica no solo, que aponta indiretamente a presença dos hidrocarbonetos da gasolina. Esses resultados remetem à importância do tempo de contaminação que os solos podem estar submetidos após o vazamento deste fluido. Deve-se lembrar ainda a necessidade do conhecimento do perfil estratigráfico do solo no qual esses postos são executados, pois percebe-se que a gasolina contamina os solos, podendo inclusive atingir lençóis freáticos. Para evitar esse tipo de contaminação, deve-se atentar para a proteção do solo antes da colocação do tanque. É usual utilizar-se solo compactado para proteger lençóis e solos mais profundos. Porém, percebe-se pelos resultados desta pesquisa que mesmo o solo compactado em uma energia de compactação normal ainda podem ser atingidos pelo contaminante, permitindo inclusive que o fluido agressivo ultrapasse essa camada compactada, que se tinha o objetivo de proteger o solo natural e lençóis freáticos. Por este motivo, indica-se a utilização de outros materiais, como por exemplo um geossintético⁸ como camada de proteção do solo, especificamente as geomembranas, podendo ser de alta densidade ou flexíveis, protegidas por um geotêxtil. Indica-se os geossintéticos, pois o desempenho destes materiais em contato com a gasolina comum é bastante satisfatório como citado por BUENO (2007). No trabalho da citada autora, entre outros estudos, foram analisadas amostras de

⁸ geossintéticos: Materiais poliméricos oriundos da indústria petroquímica muito utilizados em obras de proteção ao meio ambiente

geomembranas, flexível e rígida, para variados tempos de contato com a gasolina comum, e percebeu-se que esses materiais não sofrem degradação química ao ponto de rompê-la, para intervalos de tempo de até 24 meses. Esses resultados propiciam a indicação dos geossintéticos como camadas de proteção dos solos para o caso de impermeabilização do solo para as camadas abaixo dos tanques do combustível, em substituição ao solo compactado.

Na pesquisa utilizou-se gasolina comum devido ao grande interesse em conhecer o processo de contaminação do solo com a presença deste fluido. Observou-se que realmente muitos parâmetros do solo são alterados. Para complementar trabalhos como este, sugere-se ainda:

- Utilizar diferentes tipos de combustíveis como agentes contaminadores do solo. Por exemplo, diesel e álcool;
- Análise dos índices de vazios do solo em menores espaços de tempo do que os analisados no presente trabalho;
- Realizar análise dos citados índices para períodos maiores que 04 meses de contato do solo com a gasolina para verificar se irão estabilizar ou persistir aumentando com o passar do tempo;
- Analisar a resistência do solo contaminado através de ensaios de cisalhamento;
- Análise detalhada do índice de vazios do solo, não somente através dos resultados obtidos no ensaio de adensamento.

- Conforme foi apresentado no item 4.3.2 do presente trabalho, no que diz respeito à contaminação do solo com gasolina comum, houve problemas técnicos quanto ao uso de material hospitalar no experimento. A proposta de trabalhar-se com o gotejamento visava simular de forma mais real um possível vazamento lento e contínuo de um tanque de armazenamento de combustível. Portanto, segue como sugestão para pesquisas futuras aprimorar essa técnica utilizando matérias que não reagem, pelo menos não com tanta intensidade, à agressividade do contaminante, como o uso de geossintéticos, por exemplo;
- Também fica como sugestão para pesquisas futuras o estudo de diferentes tipos de remediação do solo contaminado. Por exemplo, a recuperação feita com utilização de bactérias como agentes, a biorremediação;
- Utilizar energia intermediária na compactação dos corpos de prova;
- Realizar o ensaio de adensamento com amostra indeformada do solo;
- Realizar os ensaios de limites de Atterberg e granulometria do solo após a contaminação com gasolina comum durante os variados períodos de tempo;
- Analisar a expansão do solo no topo do corpo de prova para verificar se houve redução do volume que ocasionaria a diminuição do índice de vazios observada nessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508**. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 1984.

_____. **NBR 6457**. Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 1986

_____. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 1984

_____. **NBR 7181**. Solo – Análise granulométrica. 1984

_____. **NBR 7180**. Solo – Determinação do limite de plasticidade. 1984

_____. **NBR 6459**. Solo- Determinação do limite de liquidez. 1984

_____. **NBR 7182**. Solo – Ensaio de Compactação. 1986

_____. **NBR 12007- MB 3336**. Solo- Ensaio de Adensamento Unidimensional. 1990

_____. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. 1984

_____. **NBR 13786**. Posto de Serviço – Seleção dos Equipamentos para Sistemas para Instalações Subterrâneas de Combustíveis. 2005

AZAMBUJA., COSTA., NANNI. V-042 – **O Emprego da Prospeção Geofísica na Avaliação de Plumas de Contaminação por Hidrocarbonetos**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000.

BRAIDA, João Alfredo. **MATÉRIA ORGÂNICA E RESÍDUOS VEGETAIS NA SUPERFÍCIE DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM O COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**. Santa Maria, 2004

BUENO, M.T.N.S. **Análise da Degradação de Alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos**. 2007. 229 f. Tese (Doutorado em Geotecnia)- Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

CAPUTO, Homero Pinto, 1990. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1 : fundamentos** / Homero Pinto Caputo. – 6 ed., rev. e ampl. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro : LTC, 2011. 248p.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica** / Braja M. Das ; tradução EZ2Translate ; revisão técnica Leonardo R. Miranda. – São Paulo : Cengage Learning, 2011.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2009

FARIAS, W. M. **Condutividade Hidráulica dos Solos Tropicais Compactados a Hidrocarbonetos da Gasolina**. [DISTRITO FEDERAL] 2003

FERREIRA, Douglas Guedes. **Biorremediação de Solo Argiloso Contaminado com Gasolina Aditivada com Diferentes Teores de Etanol/** Douglas Guedes Ferreira. - 2010

MARIANO, Adriano Pinto. **Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel** / Adriano Pinto Mariano. – Rio Claro : [s.n.], 2006

MERCER, J.W.; COHEB, R.M. **A Review of immiscible fluids in the subsurface: properties, models, characterization and remediation**. Journal of Contamin. Hydrology, V.6, 1990. pp. 107-163.

SANTOS, MIRIAN DOS ANJOS. **AValiação DE RISCO A SAÚDE HUMANA POR EXPOSIÇÃO AMBIENTAL A HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS MONOCÍCLICOS- ESTUDO DE CASO**. 2009

Pearson, G. and Oudjick, R. (1993), **Investigation and Remediation Petroleum product releases from residential storage tanks**. Ground Water Monitoring Review, 13, 124-128

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/3º Edição** Carlos de Sousa Pinto.— São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POPP, José Henrique. **Geologia Geral**. 6º Edição. 2010

SCHMIDT, Celina Aída Bittencourt. **Remediação in situ de solos e águas subterrâneas contaminados por líquidos orgânicos não miscíveis em água (NAPLs)** Série Temática: Resíduos Sólidos e Geotecnia Ambiental – Volume 1 Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ / 2010. 62 p.

SENGIK, ERICO S. **OS MACRONUTRIENTES E OS MICRONUTRIENTES DAS PLANTAS**. 2003

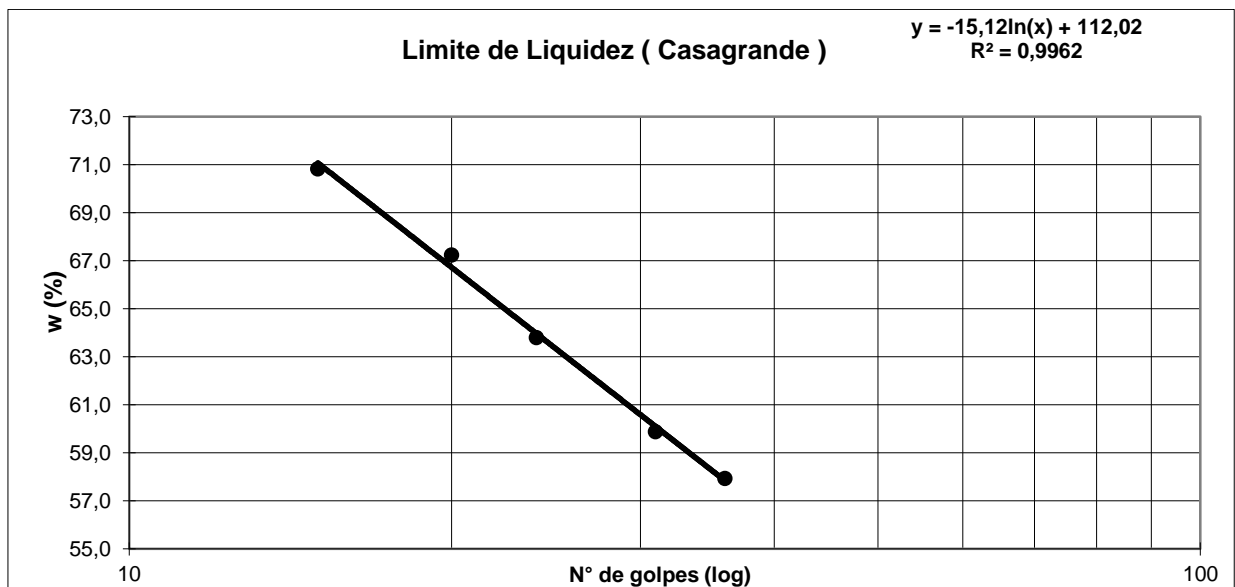
ANEXO I

Ensaio de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade

LIMITE DE LIQUIDEZ					
Nº da capsula	80	87	90	98	88
Nº de golpes	36	31	24	20	15
tara (g)	5,94	5,99	5,97	6,04	5,84
tara + SH (g)	21,54	21,50	22,91	24,14	18,56
tara + SS (g)	15,82	15,69	16,31	16,86	13,29
Umidade (%)	57,94	59,88	63,80	67,25	70,84
				WL (%):	63,35

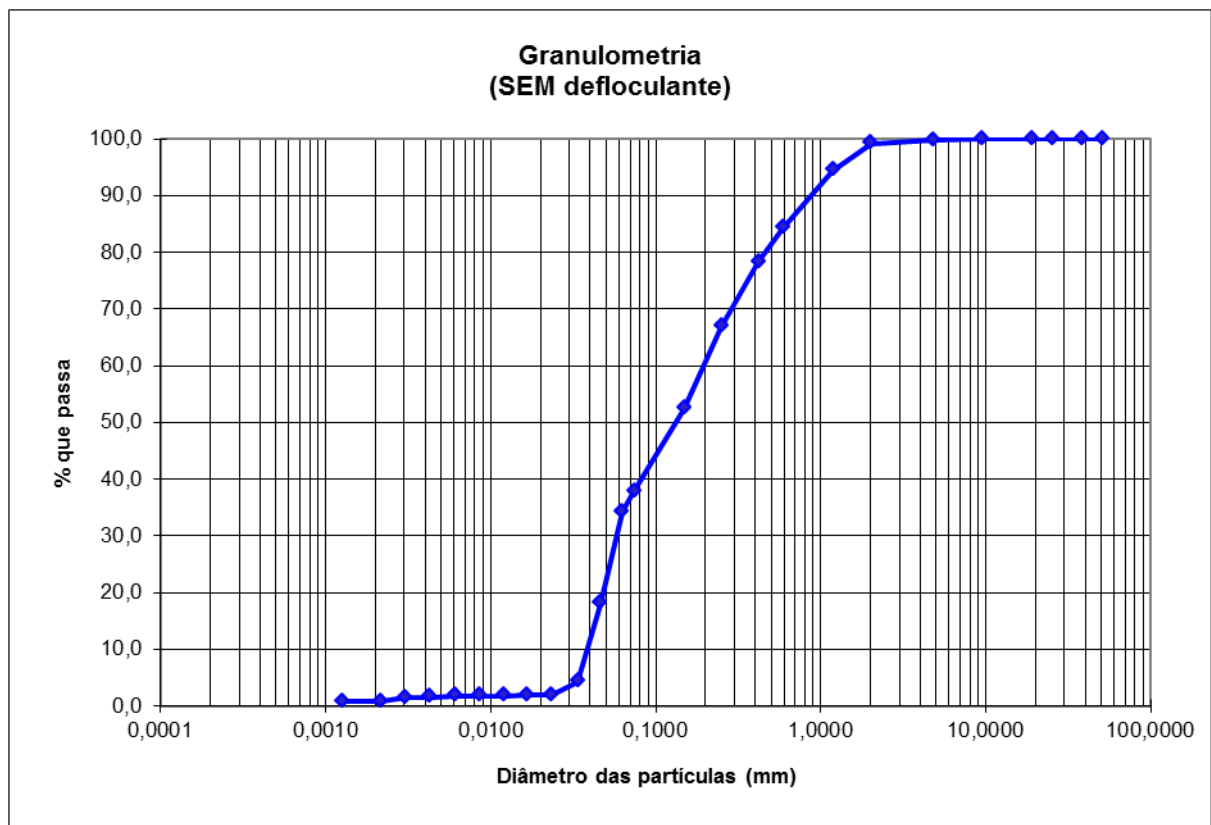
LIMITE DE PLASTICIDADE					
Nº da capsula	110	58	59	82	96
tara (g)	5,70	5,88	5,63	6,05	5,55
tara + SH (g)	8,57	8,07	7,72	8,36	8,70
tara + SS (g)	7,79	7,47	7,15	7,73	7,85
Umidade (%)	37,8	37,4	37,5	37,2	37,2
				WP(%):	37,43

ÍNDICE DE PLASTICIDADE (%): 25,9



ANEXO II

Curva Granulométrica sem Agente Defloculante



ANEXO III

Resultados Completos - Análise Química : pH e Fertilidade

Tabela 1 – Valores Comparativos das Amostras Natural e Contaminada Durante 02 Meses Relativos à Base do Corpo de Prova.

Amostra Natural X Contaminada (02 meses) - Base			
Complexo Sortivo	Natural Quantidade	Contaminada Quantidade	Unidade
pH em H ₂ O	6,8	6,7	sem unidade
pH em KCl	5,4	5,7	sem unidade
FÓSFORO - P	0,5	0,3	mg/dm ³ = ppm
CÁLCIO - Ca	0,6	0,4	cmolc/dm ³ = mE/100mL
MAGNÉSIO - Mg	0,3	0,2	cmolc/dm ³ = mE/100mL
POTÁSSIO - K	0,03	0,07	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SÓDIO - Na	0,01	0,02	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ALUMÍNIO - Al,	0	0	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ACIDEZ (H + Al)	2	1,9	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SOMA DAS BASES	0,94	0,69	cmolc/dm ³ = mE/100mL
CTC ou T	3	3	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SATURAÇÃO por BASES - V	32	27	%
SATURAÇÃO por ALUMÍNIO	0	0	%
SATURAÇÃO com SÓDIO - ISNa	0,3	0,8	%
CARBONO ORGÂNICO	1,3	8,3	g/kg
MATÉRIA ORGÂNICA - MO	2,2	14,3	g/kg

Tabela 2 – Valores Comparativos das Amostras Natural e Contaminada Durante 02 Meses Relativos ao Topo do Corpo de Prova.

Amostra Natural X Contaminada (02 meses) - Topo			
Complexo Sortivo	Natural Quantidade	Contaminada Quantidade	Unidade
pH em H ₂ O	6,8	6,8	sem unidade
pH em KCl	5,6	5,8	sem unidade
FÓSFORO - P	0,4	0,4	mg/dm ³ = ppm
CÁLCIO - Ca	0,5	0,3	cmolc/dm ³ = mE/100mL
MAGNÉSIO - Mg	0,2	0,2	cmolc/dm ³ = mE/100mL
POTÁSSIO - K	0,06	0,03	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SÓDIO - Na	0,02	0,02	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ALUMÍNIO - Al,	0	0	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ACIDEZ (H + Al)	1,9	1,9	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SOMA DAS BASES	0,78	0,55	cmolc/dm ³ = mE/100mL
CTC ou T	3	2	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SATURAÇÃO por BASES - V	29	22	%
SATURAÇÃO por ALUMÍNIO	0	0	%
SATURAÇÃO com SÓDIO - ISNa	0,7	0,8	%
CARBONO ORGÂNICO	2	11,5	g/kg
MATÉRIA ORGÂNICA - MO	3,4	19,8	g/kg

Tabela 3 – Valores Comparativos das Amostras Natural e Contaminada Durante 04 Meses Relativos ao Topo do Corpo de Prova.

Amostra Natural X Contaminada (04 meses) - Base			
	Natural	Contaminada	
Complexo Sortivo	Quantidade	Quantidade	Unidade
pH em H ₂ O	6,8	6,5	sem unidade
pH em KCl	5,4	6,6	sem unidade
FÓSFORO - P	0,5	0,3	mg/dm ³ = ppm
CÁLCIO - Ca	0,6	0,9	cmolc/dm ³ = mE/100mL
MAGNÉSIO - Mg	0,3	0,3	cmolc/dm ³ = mE/100mL
POTÁSSIO - K	0,03	0,03	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SÓDIO - Na	0,01	0,02	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ALUMÍNIO - Al,	0	0	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ACIDEZ (H + Al)	2	1,6	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SOMA DAS BASES	0,94	1,25	cmolc/dm ³ = mE/100mL
CTC ou T	3	3	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SATURAÇÃO por BASES - V	32	41	%
SATURAÇÃO por ALUMÍNIO	0	0	%
SATURAÇÃO com SÓDIO - ISNa	0,3	0,7	%
CARBONO ORGÂNICO	1,3	5,7	g/kg
MATÉRIA ORGÂNICA - MO	2,2	9,8	g/kg

Tabela 4 – Valores Comparativos das Amostras Natural e Contaminada Durante 04 Meses Relativos ao Topo do Corpo de Prova.

Amostra Natural X Contaminada (04 meses) - Topo			
	Natural	Contaminada	
Complexo Sortivo	Quantidade	Quantidade	Unidade
pH em H ₂ O	6,8	6,6	sem unidade
pH em KCl	5,6	6,4	sem unidade
FÓSFORO - P	0,4	0,9	mg/dm ³ = ppm
CÁLCIO - Ca	0,5	3,1	cmolc/dm ³ = mE/100mL
MAGNÉSIO - Mg	0,2	0,8	cmolc/dm ³ = mE/100mL
POTÁSSIO - K	0,06	0,02	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SÓDIO - Na	0,02	0,01	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ALUMÍNIO - Al,	0	0	cmolc/dm ³ = mE/100mL
ACIDEZ (H + Al)	1,9	1,8	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SOMA DAS BASES	0,78	3,93	cmolc/dm ³ = mE/100mL
CTC ou T	3	6	cmolc/dm ³ = mE/100mL
SATURAÇÃO por BASES - V	29	69	%
SATURAÇÃO por ALUMÍNIO	0	0	%
SATURAÇÃO com SÓDIO - ISNa	0,7	0,2	%
CARBONO ORGÂNICO	2	17,6	g/kg
MATÉRIA ORGÂNICA - MO	3,4	30,3	g/kg